

## S-net データを用いた津波浸水予測システムの開発 Real-time tsunami inundation forecast system using S-net data

青井 真<sup>1\*</sup>; 山本 直孝<sup>1</sup>; 鈴木 亘<sup>1</sup>; 中村 洋光<sup>1</sup>; 功刀 卓<sup>1</sup>; 久保 智弘<sup>1</sup>; 平田 賢治<sup>1</sup>; 前田 宜浩<sup>1</sup>  
AOI, Shin<sup>1\*</sup>; YAMAMOTO, Naotaka<sup>1</sup>; SUZUKI, Wataru<sup>1</sup>; NAKAMURA, Hiromitsu<sup>1</sup>; KUNUGI, Takashi<sup>1</sup>;  
KUBO, Tomohiro<sup>1</sup>; HIRATA, Kenji<sup>1</sup>; MAEDA, Takahiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>NIED

2011年東北地方太平洋沖地震では、初期段階において推定・予測した津波規模が実際と比較して大きく下回ったことや停電などにより津波情報が住民に十分に伝わらなかったことが被害を拡大した。このことから明らかなように、津波被害を軽減するためには巨大地震に伴い発生する津波を即時に予測し、住民避難のために必要な情報を適切に提供する事が極めて重要である。東北地方太平洋沖地震の発生時には房総沖から釧路・根室沖にかけての広大な海域は観測の空白域であり、迅速かつ適切な津波即時予測を行うために不可欠な観測データが乏しかった。このことから、防災科研では文部科学省の補助金により、当該海域に S-net (日本海溝海底地震津波観測網) を構築している (金沢・他, 2012, JpGU; Uehira et al., 2014, AOGS; 植平・他, 2015, 本大会)。S-net は、全長約 5700km の海底ケーブルで接続され海底に設置された金属製の耐圧容器の観測装置 150 点からなり、各々には水圧計及び地震計がインストールされている。このような大規模かつ稠密なリアルタイム海底観測網は世界でも類を見ないものであり、これらのデータを活用することで津波を現状より最大 20 分程度早く直接検知し、緊急地震速報を最大 30 秒程度早く出すことが出来るようになること期待される。本研究では、S-net 等から得られるデータを用いて沖合で津波の発生を直接検知するとともに津波の沿岸波高のみならず遡上を即時推定するためのシステムを、最初に S-net の観測の開始が予定されている房総沖に面する外房地域 (千葉県太平洋沿岸) を対象に開発している。沖合津波観測データを用いた津波予測手法は、津波波源を逆解析で推定し順計算により沿岸波高や浸水を予測する手法 (例えば Tsushima et al., 2012) や、沖合津波波高と沿岸波高の関係式による手法 (例えば Baba et al., 2013) などこれまででも多くの既往研究がある。本研究では、比較的高計算負荷かつ非線形現象である津波遡上の予測を目的にしていることから、事前に数多くの震源シナリオに対する浸水状況をデータバンクとして用意し、観測データと時空間マッチング (Yamamoto et al., 2014, AGU; 鈴木・他, 2015, 本大会) を行うことによりシナリオを絞り込み、浸水予測を行う。このような検索型手法と稠密な沖合観測データの組み合わせにより、大きな推定誤差の原因になり得る震源 (津波波源) 情報に立ち戻ることなく浸水の推定を直接行うことが本研究の特徴の一つである。津波遡上を精度高くシミュレーションするために対象地域である外房地域において 10m 分解能の沿岸地形モデルを構築するとともに局所細分化適合格子法による津波シミュレーションモデル (前田・他, 2015, 本大会) を構築している。この際、防潮堤などの津波防護施設の破壊の効果をとり込むため構造物はラインデータとしてモデル化する。また、計算負荷の高い浸水シミュレーションは数千ケース程度しか実施できないことから、効果的に波源モデルを設定してバンクを構築することが高精度な推定を行う上で重要となるため、線形長波理論に基づく低負荷な計算による感度解析により対象地域での津波波高をおおまかに評価しバンクに取り込むべき波源モデルを設定する。観測データや予測情報を分かりやすく提供し住民避難に繋げる試みとして、地震及び津波をリアルタイムで実況する地震・津波モニタや利活用しやすく情報を提供可能とする API (Application Programming Interface) を試作した。今後、自治体等と協同して行う実証実験の結果をフィードバックし高度化を目指す。

キーワード: 津波, 津波即時予測, 津波浸水予測, S-net

Keywords: tsunami, real-time tsunami forecast, tsunami inundation forecast, S-net

## 海底水圧計データを用いた津波即時予測のためのアルゴリズム検討 Examination of algorithms toward real-time tsunami forecast using ocean bottom pressure data

鈴木 亘<sup>1\*</sup>; 山本 直孝<sup>1</sup>; 青井 真<sup>1</sup>; 平田 賢治<sup>1</sup>; 中村 洋光<sup>1</sup>; 功刀 卓<sup>1</sup>  
SUZUKI, Wataru<sup>1\*</sup>; YAMAMOTO, Naotaka<sup>1</sup>; AOI, Shin<sup>1</sup>; HIRATA, Kenji<sup>1</sup>; NAKAMURA, Hiromitsu<sup>1</sup>;  
KUNUGI, Takashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup> NIED

防災科学技術研究所では、現在敷設中の日本海溝海底地震津波観測網 (S-net; 植平・他, 2015, 本大会) 等による沖合で観測されるデータを活用して、津波発生時に沿岸での津波波高のみならず陸域への津波遡上までを迅速に予測する手法の開発と、千葉県外房地域を対象として実稼働する津波遡上即時予測システムのプロトタイプ構築を進めている (青井・他, 2015, 本大会)。本研究ではこの津波遡上即時予測システム開発のために、海底水圧計による津波データを用いた津波即時予測アルゴリズムに関する検討を行う。沖合での津波観測データを用いたリアルタイム津波予測手法としては、逆解析で推定した津波波源からフォワード計算により沿岸での水位や対象都市での浸水を予測する手法 (例えば Tsushima et al. 2012; 2014, 辰巳・富田, 2013)、沖合観測波高などに基づくデータベース検索より浸水予測を行う手法 (例えば阿部・今村, 2012)、沖合津波波高と沿岸波高の経験的もしくは数値シミュレーションによる関係式を用いる手法 (例えば高山 2008, Baba et al., 2014) などが提案されている。非線形現象である津波遡上までを広い地域に亘って予測するために本研究ではデータベース検索型の手法を採用し、海溝型地震の震源域直上で稠密に観測された水圧データを用いることにより迅速かつ詳細な予測の実現を目標とする。そのため波源モデルを設定して非線形シミュレーションにより得られる沖合観測点での津波波形、沿岸での津波高や到達時間、対象地域での浸水分布、到達時間などの一連の計算結果を一つの津波シナリオとし、予測対象地域に影響を及ぼすと考えられる様々な波源モデルの津波シナリオからなる津波シナリオバンクを事前に構築する。地震、津波検知時には沖合観測点で観測されている水圧変動を説明するシナリオをシナリオバンクより選び出すことにより、沖合水圧データに結びつく沿岸波高分布や対象地域での浸水分布を基に津波予測情報を生成する。シナリオ選択において観測データに似たシナリオを1つに限らず複数選択可能とすることで不確実性を適切に取り込んだ予測を行い、時間の経過とともに津波の発生、伝播が明瞭に確認されるにつれシナリオ、予測の絞込みを図っていく。本研究では東日本太平洋沿岸地域に影響を与える可能性のある地震津波の波源モデルによる約 2000 シナリオについて、S-net 観測点での沖合水圧データを用いてシナリオ選別アルゴリズムの検討を行う。

我々が検討を進めているアルゴリズムの1つは、山本・他 (2014, 地震学会) に基づくもので、各時刻での水圧値の空間分布について複数の一致度評価指標すべてがそれぞれの閾値内となるシナリオを選び出していくアルゴリズムである。評価指標としては、まず、各時刻での水圧の振幅の相関係数、振幅比の幾何平均及び幾何標準偏差を用いている。これら3つの指標を組み合わせて一致度評価を行った検討により、単一の評価基準を用いるのに比べて、シナリオ選別においては津波遡上即時予測をより確実に行うことのできる可能性を示す結果が得られた。さらに観測値もしくはシナリオの値を用いて正規化した2種類の Variance Reduction を組み合わせて用いる検討を行った。観測値で正規化した Variance Reduction はシナリオの値が観測値より大きい、すなわち予測値が過大評価である場合に対して感度が高く、反対にシナリオの値で正規化した場合には予測値の過小評価に対して感度が高いため、2つ併せて利用することにより津波の規模の予測を向上できる可能性を示した。上述してきたアルゴリズムは津波伝播の様子を時間ごとにスナップショットをとって評価することによりシナリオを絞り込んでいくアルゴリズムであるが、異なるアプローチとして沖合観測点での水圧波形時系列そのものについて観測値とシナリオの一致度評価を行うアルゴリズムについても検討を進めていく予定である。

キーワード: 津波即時予測, 遡上, シナリオバンク, S-net

Keywords: Real-time tsunami forecast, Tsunami inundation, Scenario bank, S-net

## 局所細分化適合格子法を用いた津波シミュレーション A tsunami propagation modeling based on the adaptive mesh refinement

前田 宜浩<sup>1\*</sup>; 青井 真<sup>1</sup>; 岩城 麻子<sup>1</sup>; 早川 俊彦<sup>2</sup>  
MAEDA, Takahiro<sup>1\*</sup>; AOI, Shin<sup>1</sup>; IWAKI, Asako<sup>1</sup>; HAYAKAWA, Toshihiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup> 三菱スペース・ソフトウェア株式会社  
<sup>1</sup>NIED, <sup>2</sup>Mitsubishi Space Software Co.,ltd.

津波シミュレーションを効率的に行う上で格子数の低減は有効な手段である。格子の大きさは津波の伝播速度に依存するため、津波の発生から遡上までの計算を行う場合、外洋部から沿岸部まで海底地形に応じた最適な格子間隔を設定し、それらを適切に接続する必要がある。多くの津波シミュレーションでは、格子間隔の異なる複数の領域を接続する手法としてネスティングが用いられているが、ネスティングに基づく津波シミュレーション手法では、一度の計算では特定の狭い領域しか計算できないため、東北地方太平洋沖地震のように非常に広範囲を襲う津波の場合には、対象領域を覆い尽くすために多数回の計算を行う必要がある。本研究では、局所細分化適合格子法 (AMR: Adaptive Mesh Refinement 法) による格子の最適化と並列計算を組み合わせ、効率的に高精度で広域のシミュレーションを可能とする手法について検討している。

格子細分化については、CFL 条件 (Courant-Friedrichs-Lewy Condition) に基づいて四分木構造格子、あるいは九分木構造格子を用いて細分化された局所細分化適合格子の自動生成を行っている。細分化においては既往研究 [例えば、Popinet(2003) など] を参考とし、隣接するセル (四分木や九分木の集合体) では格子サイズが2段階以上変化しないことなどを条件としている。また、局所細分化適合格子を用いた二次元非線形長波津波計算では、差分法を採用している。現状では、シングルプロセスでの実行に対応しているが、今後は並列化することで更なる効率化を図ることを予定している。

キーワード: 津波, シミュレーション, 局所細分化適合格子法, 多分木格子  
Keywords: tsunami, simulation, adaptive mesh refinement, tree-structure grid

## tFISHを用いた近地津波予測の性能評価-2011年3月9日三陸沖の地震(M7.3)を事例に-

### Retrospective evaluation of tFISH performance: Forecasting of tsunami caused by the M 7.3 earthquake on Mar. 9, 2011

堀内 明子<sup>1\*</sup>; 日野 亮太<sup>2</sup>; 太田 雄策<sup>1</sup>; 久保田 達矢<sup>1</sup>; 対馬 弘晃<sup>3</sup>  
HORIUCHI, Akiko<sup>1\*</sup>; HINO, Ryota<sup>2</sup>; OHTA, Yusaku<sup>1</sup>; KUBOTA, Tatsuya<sup>1</sup>; TSUSHIMA, Hiroaki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>3</sup> 気象庁気象研究所

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>International Research Institute of Disaster Science, <sup>3</sup>Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

2011年3月9日、三陸沖を震源とする Mw7.3 のプレート境界型地震(2011年東北地方太平洋沖地震の最大前震)が発生した。これに伴って、岩手県から宮城県の沿岸で 50cm ほどの津波が観測された。この地震が発生したとき、震源周辺には東北大学によって自己浮上式海底圧力計が 9 台設置されており、振幅 10cm から 30cm 程度の津波波形が得られた。久保田(2012)は、この津波波形の詳細な解析により、この最大前震の地震時すべり分布を推定した。この観測波形は、地震発生後に機材を回収して得られたものであるが、仮にこうした観測データをリアルタイムで得ることができれば、沿岸津波の予測精度の向上に大きく貢献することが期待される。

そこで、本研究ではこの沖合津波観測データに対して近地津波予測アルゴリズム tFISH を適用して、沿岸の津波波形の予測を行った。沖合の波形データの逆解析により海面の初期波高分布を推定し、これに基づいて計算した沿岸における津波波形を実際に沿岸で観測された津波波形と比較して、予測精度を評価した。

その結果、地震発生 6 分後、最も早く沿岸に津波が到達する 25 分前に、第 1 波到達時刻は ± 2 分以内の誤差で予測でき、観測波形の半分から 2 倍程度までの範囲で一致する予測津波波形を得ることができた。このように、地震発生後の短時間のうちに高い精度で津波を予測できたのは、震源(波源)域に海底圧力計が高密度で設置されていたために、地震発生 6 分後には波源域で発生した津波の主要な部分が観測点のいずれかに到達し、初期波源を精度よく推定できたためであると考えられる。

本研究の結果は、高密度の沖合観測網を構築し、得られるデータに tFISH アルゴリズムを適用することにより、規模は小さくとも、比較的高頻度で発生すると考えられる M7 級の地震による津波を高い精度で予測することが可能となることを実証するものである。

キーワード: 近地津波予測, 海底圧力計, 津波波形インバージョン

Keywords: Near-field tsunami forecasting, ocean-bottom pressure gauge, tsunami waveform inversion

## リアルタイム津波浸水予測精度向上に向けた波源逆解析手法の検討 (2) Investigation on Tsunami Source Inversion Methods for Real-time Inundation Predictions (2)

大石 裕介<sup>1\*</sup>; 今村 文彦<sup>2</sup>; 菅原 大助<sup>2</sup>; 古村 孝志<sup>3</sup>

OISHI, Yusuke<sup>1\*</sup>; IMAMURA, Fumihiko<sup>2</sup>; SUGAWARA, Daisuke<sup>2</sup>; FURUMURA, Takashi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 富士通研究所, <sup>2</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>3</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Fujitsu Laboratories LTD., <sup>2</sup>International Research Institute for Disaster Science, Tohoku University, <sup>3</sup>Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

### 1. 研究の目的と背景

本研究の目的は、大地震発生に伴う津波が陸域に襲来する前に浸水状況を高い精度で予測するために、リアルタイム観測データを用いて津波波源を逐次推定する手法を開発することである。近年、リアルタイム観測データを活用した津波防災対策に向け、沖合での津波観測や陸域での GPS 測地観測網の強化が行われている。例えば、防災科学研究所が現在配備を進める S-net は、日本海溝周辺域を 150 点に渡って、広範囲・高密度に、津波および地震動を観測する大規模なシステムである。これら観測網を用いてリアルタイムに津波の浸水を予測する手法もこれまでいくつか提案されているが、事前に浸水計算結果のデータベースを準備し、何等かの基準に基づいてその中から妥当な予測結果を検索するものが一般的である (e.g., 馬場・他, 2012; Gusman et al., 2014; 山本・他, 2014)。これらの手法は、即時性に優れているものの、広範囲にわたって多様な断層破壊過程を持つ巨大地震に対して、各地の津波浸水を総合的に評価することは難しいと考えられる。

津波による浸水を地震発生直後に予測するもう一つのアプローチは、津波の波源となる海面変動を即時的に推定し、それを入力とする浸水計算をリアルタイムで実施するものである。近年の計算機技術の発展に伴い、浸水計算は十分に高速に実施可能となっており (e.g., Oishi et al., 2015)、多くの場合陸域への津波の到達前に数分以内で完了することができる。しかしながら、津波波源をリアルタイムに推定する手法に関しては、これまでも多くの研究開発が行われているが (e.g., Tsushima et al., 2014; Ohta et al., 2011)、それらは沿岸の津波高を精度良く推定する目的には適合するが、特定地域での浸水予測までは考慮されていない。

### 2. 高精度浸水予測に向けたリアルタイム波源推定

浸水予測を考慮した波源推定として、大石・他 (2014, 日本地震学会秋季大会) は、逆解析により波源モデルを求める際に、高解像度 (5 m メッシュ) で計算する浸水予測域 (ネスティングの内側領域) の沖合での観測波形の再現性を重視する重み付けを行うことで、注目している解析域への津波入射波の精度を保つ手法を提案した。加えて、本研究では、陸上での GPS 測地データによる地殻変動推定結果を波源推定に取り入れることで、浸水予測の精度向上を図る手法を提案する。GPS 測地データによる地殻変動推定は、沖合での精度は限定的だが、沿岸域においては高い精度を持つ。そのため、本手法では、沖合津波観測点よりも陸側の海域と陸域での海面変動・地殻変動を GPS 測地データのみによって推定し、そして沖合津波観測点よりも海側の海面変動は沖合津波波形によって推定する。これにより、沖合波源域・陸域間の津波伝播経路の海面変動と、浸水高の評価に必要な陸域の地盤沈下の両方を精度良く波源モデル推定に取り込むことができ、浸水予測精度が向上すると期待される。

### 3. 東北地方太平洋沖地震の津波浸水予測への適用

本手法を 2011 年東北地方太平洋沖地震に適用し、仙台市および宮古市を 5m メッシュでモデル化した津波浸水シミュレーションを実施した。その結果、宮古検潮所の巨大津波計や、仙台新港の海象計での津波観測波形をよく再現でき、浸水解析域への入射波が精度よく予測されたことが確認された。また、注目している浸水解析域の沖合での津波波形を重視した逆解析によって、時々刻々と得られる津波観測データを用いて波源モデルを更新する際に、注目している浸水解析領域への入射波形の予測に収束性が得られ、収束後は浸水予測も観測とよく一致する結果が得られた。

キーワード: 津波浸水シミュレーション, リアルタイム波源推定

Keywords: Inundation simulations, real-time tsunami source prediction

## 津波増幅率を用いた津波即時予測システムの構築 Construction of tsunami prediction system using tsunami amplification

高橋 成実<sup>1\*</sup>; 石橋 正信<sup>1</sup>; 中村 武史<sup>1</sup>; 馬場 俊孝<sup>2</sup>; 金田 義行<sup>3</sup>  
TAKAHASHI, Narumi<sup>1\*</sup>; ISHIBASHI, Masanobu<sup>1</sup>; NAKAMURA, Takeshi<sup>1</sup>; BABA, Toshitaka<sup>2</sup>;  
KANEDA, Yoshiyuki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 徳島大学, <sup>3</sup> 名古屋大学

<sup>1</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>2</sup>University of Tokushima, <sup>3</sup>Nagoya University

南海トラフ域では最大 M9 の巨大地震発生の可能性が指摘され、各県が被害想定の見直しや防災対策計画の策定に追われている。しかし、紀伊半島南部や室戸岬周辺など、震源域に近いところでは津波の到達時間が短く、津波の早期検知の必要性が求められていた。そのため、即時的に津波の高さと到達時刻を予測できるように、(独)海洋研究開発機構(JAMSTEC)では、津波増幅率の概念に基づく地震津波観測・監視システム(DONET)データを用いた津波即時予測システムを構築した。

津波は水深によって速度が変化するため、津波の高さは地形に大きく依存している。JAMSTECでは、この点に着目し津波増幅率の即時予測の可能性を調べてきた(Baba et al., 2013)。断層モデルを仮定し、DONET20観測点と対象となる沿岸都市の津波高を計算する。断層モデルは、南海トラフのプレート境界に沿って1500ケース以上想定し、あらゆる方向からの津波伝播を視野に入れた。沿岸対象都市としては、これまで串本町、尾鷲市、御前崎市を取り上げ、津波のデータベースを構築した。DONETの地震・津波データを伝送し、地震と津波を自動検知し、DONET20観測点の絶対値平均をリアルタイムで計算し、津波データベースの中から、対象沿岸都市ごとのDONET観測点の絶対値平均に対する相関図を作成し、その中から該当するモデルを選び出すこととしている。これまで1944年の東南海地震の理論波形をこのシステムに導入し、この津波即時予測システムの予測誤差を低減させる検討をしてきた。その結果、計算する観測点と震源モデルの絞り込みが予測の精度を上げることに貢献することが明らかになった。本発表では、この津波即時予測システムの概念とその内容、今後の精度向上の展望について発表する。

キーワード: 津波増幅率, 即時予測, DONET, 南海トラフ

Keywords: tsunami amplification, immediate prediction, DONET, Nankai Trough

津波発生域で観測された津波波形を直接初期条件とする新しい津波数値計算手法—  
観測波形から直接津波予測を行う手法の開発—  
A new technique for tsunami numerical simulation using tsunami observations in a source  
region as an input

谷岡 勇市郎<sup>1\*</sup>  
TANIOKA, Yuichiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>北海道大学理学研究院地震火山研究観測センター  
<sup>1</sup>Hokkaido University

2011年東北地方太平洋沖巨大地震による甚大な津波被害を受けて、津波予報の高度化は重要な研究課題である。さらに、防災科学技術研究所は日本海溝・千島海溝に沿って約125の津波計（圧力計）と地震計がケーブル式ネットワークシステム（S-Net）として設置中である。房総沖から三陸沖にかけてはすでに設置が完了している。また、南海トラフ沿いには海洋研究開発機構にとってDONETおよびDONET2が設置されている。これらの津波計では津波発生域で直接津波を観測できる。現在の津波数値計算は、観測された地震波形から、断層モデルを推定し、地殻変動を計算し、それを初期値として津波数値計算を実行する。または、最近では、津波観測波形から、初期の海面変動を推定し、それを初期値として津波数値計算を実施している（Tsushima et. al., 2012）。

本研究では、津波波源域およびその近傍で観測された波形をそのまま初期値として津波数値計算を実行する新しい手法を開発した。例えば、巨大地震の震源域ではその地殻変動により海底が上下し、さらに海面も上下するため、実際に圧力変化は観測されない。しかし、その時間変化（ $h(t) - h(t + \Delta t)$ ）は正確に観測される。この海面の時間変化を初期値として津波数値計算を実施する手法を開発した。深海での津波を数値計算する場合、線形長波近似式（運動方程式と連続の式）をスタaggerドグリッドを用いて差分法で解くのが一般的である。それらの式を変形することで、海面変動の時間変化（ $h(t) - h(t + \Delta t)$ ）を既知（観測波形から得られる）として津波（ $h(t)$ ）を計算できる形にできることが分かった。新しい計算手法ではこの変形された式を用いて津波数値計算を実行する。津波波源域での津波励起が終われば、一般的な線形長波近似の差分法に戻して計算することで沿岸での津波計算につなげることができる。

本手法を用いて津波数値計算を実施すれば、津波の数値計算に地震の規模や地震の震源課程を推定する必要なく、線形長波で近似できる波であれば観測波形を初期値として計算することができる。津波予報としては画期的な手法と言える。本津波数値計算手法の有効性を確かめるため、様々な断層モデルから、現行の津波数値計算を実施し、各格子点での観測波形を計算した。それらの観測波形を既知（初期値）として本手法により津波数値計算を実施し、再現性を確認した。M8クラスの断層モデルから計算される津波波形であれば、10分間隔（約18 km）の観測点配置で観測された記録から内挿により各格子点の観測波形を作成しても十分な精度で津波数値計算が実施できることが明らかになった。本手法は観測波形と津波数値計算を同化することにも利用可能である。

キーワード: 津波数値計算手法, 津波予報, 津波ケーブル観測システム

Keywords: Tsunami numerical simulation, Tsunami forecast, S-Net, tsunami ocean bottom cable

## A multi-grid algorithm for transpacific and regional tsunami modeling A multi-grid algorithm for transpacific and regional tsunami modeling

HAYASHI, Kensaku<sup>1</sup> ; VAZHENIN, Alexander<sup>1\*</sup> ; MARCHUK, Andrey<sup>2</sup>  
HAYASHI, Kensaku<sup>1</sup> ; VAZHENIN, Alexander<sup>1\*</sup> ; MARCHUK, Andrey<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Aizu, Japan, <sup>2</sup>ICMMG SB RAS, Russia

<sup>1</sup>University of Aizu, Japan, <sup>2</sup>ICMMG SB RAS, Russia

The material presented in this paper can be divided into two parts. The first is the implementation of algorithms for generating tsunamis in the course of numerical experiments as a result of the initial ellipsoidal water surface displacement or by boundary conditions. In the second part, the realization is described of *the multi-grid algorithm for tsunami computations*.

Tsunami sources are usually located in deep-water areas. So, if we want to estimate tsunami parameters near the coastline the computational domain must include both deep and shallow-water areas. A standard stability condition for numerical algorithms used for modeling requires the wave advancement at one time step be less than a spatial grid-step. In this case, we should use a small enough time step (for the computation stability in deep-water areas of the domain), which makes computations on a shallow shelf with an unreasonably small time step be too long.

The multi-grid algorithm for the tsunami propagation computations from the initial source to the coastline that uses scale switching has been developed. Computations are carried out on a sequence of grids with various resolutions where one is embedded into another. Tsunami wave parameters are transferred from the larger domain to the embedded smaller one by means of the boundary conditions. Using the method proposed the numerical modeling of tsunami generated by a model ellipsoidal source located in the middle of the Pacific was carried out. We are demonstrating that the proposed method effectively works in case of poor correlated gridded bathymetries with different resolutions as well as in using the pipeline computational scheme.

キーワード: Tsunami Numerical Modeling, Shallow-Water Model, Computational Grid, Grid Step, Boundary Conditions, Pipelined Computing

Keywords: Tsunami Numerical Modeling, Shallow-Water Model, Computational Grid, Grid Step, Boundary Conditions, Pipelined Computing

## 潮汐・津波シミュレーション：潮流による津波到達時間の早期化 Tsunami-tide simulation: Early arrival time of tsunami due to tidal currents

中田 聡史<sup>1\*</sup>; 林 美鶴<sup>1</sup>; 小林 英一<sup>1</sup>; 越村 俊一<sup>2</sup>

NAKADA, Satoshi<sup>1\*</sup>; HAYASHI, Mitsuru<sup>1</sup>; KOBAYASHI, Ei-ichi<sup>1</sup>; KOSHIMURA, Shunichi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学海事科学研究科, <sup>2</sup> 東北大学・災害科学国際研究所

<sup>1</sup>Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University, <sup>2</sup>International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University

津波・潮汐カップリング数値モデルを浅海域に適用し、津波と潮汐の非線形相互作用が津波の到達時刻に対してどの程度影響するのかを調べた。大阪湾を実験海域として設定し、南海トラフ地震津波を想定したシミュレーションを実施した。内閣府は、将来30年以内に70%の確率でマグニチュード8~9程度の南海トラフ地震が発生する想定している。そのような規模の地震が発生した場合、湾内や港内では船舶が航行不能となる2ノットを超える流速が発生し、潮流を考慮した場合はさらに流速は大きくなる場合も考えられる。市民の避難や津波侵入域の評価など陸域の課題と同様に、係留・航行船舶が襲来した巨大津波からどのように避難するかなどといった海域特有の課題についても喫緊である。本研究グループでは、海域において発生しうる津波被害を津波マリンハザードと定義し、分野横断的な減災防災策を見出すことを急務としている。これまでに、航行(係留)中の船舶が津波から避難するための方法論が検討されているものの、風や潮流など様々な気象海象条件などの避難に不可欠な現実的な物理的要素は、局所的かつ限定的な条件の下でしか検討されていない。また、沿岸海域において潮流を考慮した津波シミュレーションはほとんど存在せず、今後はあらゆる津波マリンハザードを想定可能としていくためには現実的な気象海象も考慮する必要がある。本発表では、津波マリンハザード研究の概要を紹介し、研究成果の一例として津波シミュレーションに潮流を考慮した場合の解析結果を示す。シミュレーションでは、内閣府が新想定とした南海トラフ断層モデル、東北大学工学部で開発された津波モデル、および国立天文台で開発された潮汐モデルを使用した。埋立地など複雑な海岸地形を持つ大阪湾を高い分解能(50m)で表現するために、3段階のネスティング手法を用いた。シミュレーション結果では、津波が紀伊水道から大阪湾に侵入した時、上げ潮時には津波の進行速度が速くなり、下げ潮時には遅くなった。その結果、潮流を考慮しない場合の津波よりも、大阪湾の湾奥に津波が到達する時刻が上げ潮時には2分程度早く、下げ潮時には遅くなることがわかった。津波の津波伝播速度の加減速と潮汐位相の関係を調べると、上げ潮最強時に津波伝播速度の加速が最大となり、下げ潮最強時には減速が最大となり、津波伝播速度の加減速は潮汐周期に同期していた。これらの結果は、上げ潮や下げ潮による移流によって津波伝播速度が加速ないしは減速していることを示唆している。このような潮汐と津波の非線形過程が、浅海域における津波の早達・遅延に重要な役割を果たしており、津波到達時刻の再現性などといった津波モデルのヴァリデーションにとって不可欠な要素であるだろう。この非線形過程は、埋立地周辺における津波最大流速を最大0.2 m/s増加させていた。船舶の津波避難シナリオ・マニュアルの頑強性や津波ハザードマップの精度を向上させるためには、浅海域においては現実的な海洋・津波カップリングシミュレーションを実施することが必要になるだろう。このような取り組みは陸域への津波遡上シミュレーションの精度向上にもつながると期待される。

キーワード: 津波, シミュレーション, 潮汐, マリンハザード, 南海トラフ地震

Keywords: Tsunami, Simulation, Tide, Marine Hazard, Nankai Trough Earthquake

## 水の圧縮性と地殻弾性を考慮した線形分散波式による2011年東北地方太平洋沖地震の津波シミュレーション Tsunami simulation with linear Boussinesq equations including elastic loading and seawater density stratification

馬場 俊孝<sup>1\*</sup>; Alleger Sebastien<sup>2</sup>; Cummins Phil<sup>2</sup>; 安藤 和人<sup>3</sup>; 今任 嘉幸<sup>3</sup>; 加藤 季広<sup>4</sup>  
BABA, Toshitaka<sup>1\*</sup>; ALLEGER, Sebastien<sup>2</sup>; CUMMINS, Phil<sup>2</sup>; ANDO, Kazuto<sup>3</sup>; IMATO, Yoshiyuki<sup>3</sup>;  
KATO, Toshihiro<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 徳島大学, <sup>2</sup> オーストラリア国立大学, <sup>3</sup> 海洋研究開発機構, <sup>4</sup> 日本電気株式会社  
<sup>1</sup>Tokushima Univ., <sup>2</sup>ANU, <sup>3</sup>JAMSTEC, <sup>4</sup>NEC

2010年マウレ地震津波や2011年東北地方太平洋沖地震津波では、DARTシステムをはじめとする太平洋全域に展開された海底水圧計で、良好な波形記録が得られた。この時、線形長波式に基づく津波シミュレーションと観測記録の比較から、遠地では津波走時が再現できないこと、観測には第一波の押しの前に弱い引き波があるがシミュレーションには見られない、という2つの課題が明らかになった。この2つの課題は、Tasai et al. (2013), Watada (2013), Inazu and Saito (2013), Alleger and Cummins (2014)により検討され、水の圧縮性と地殻弾性を考慮することによって解決された。特に、Alleger and Cummins (2014)は、通常の津波計算で用いられる差分スキームにおいて水の圧縮性と地殻弾性を取り込む実用的な方法が示した。そこでは、連続の式に、海水密度分布と、地震による地殻変動を動的に与えるのと同じように津波荷重による海底の変形の効果を取り入れている。水の圧縮性と地殻弾性の効果は、運動方程式には直接関係しない。一方、一般に遠地津波波形を精度よくシミュレートするには、波数分散性を考慮する必要があるとされ、これはブシネスク型の分散項を運動方程式に加えることで実現される。本研究では、線形分散波式にAlleger and Cummins (2014)の方法で水の圧縮性と地殻弾性を考慮し、2011年東北地方太平洋沖地震の津波シミュレーションを実施した。その結果、チリ沖のDART32401など遠地の観測点では、線形長波式に水の圧縮性と地殻弾性を考慮した場合よりも、線形分散波式に考慮したほうが、観測記録の再現性が向上することが確認された。

キーワード: 津波, 分散, 水の圧縮性, 地殻弾性

Keywords: Tsunami, Boussinesq, seawater density stratification, elastic loading

## 津波電離圏ホール検知による早期津波予測の高精度化 Early warning system of tsunami by measuring tsunamigenic ionospheric hole

金谷 辰耶<sup>1\*</sup>; 鴨川 仁<sup>1</sup>  
KANAYA, Tatsuya<sup>1\*</sup>; KAMOGAWA, Masashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京学芸大学教育学部物理学科  
<sup>1</sup>Dpt. of Phys., Tokyo Gakugei Univ.

海溝型巨大地震発生約9分後に生じる津波電離圏ホールの検知を、GPS-TEC (GPS 受信点から衛星までの視線方向に対する電離圏全電子数) 観測によって行う。津波電離圏ホールとは広域で、1時間程度継続する電離圏プラズマの津波起因の減少で、減少量は発生した津波の規模に関連する。本研究の推進により、到来津波規模の同定は早くても10分程度で行えると期待できる。また津波電離圏ホールの検知は、インターネット上に公開されているGPSデータで可能なため、本研究は既存のインフラで行える利点がある。我々の現在の技術ではマグニチュード9クラスの津波規模同定に20分程度かかるため、本研究で、これらを15分程度まで縮める手法を発表する。本研究は中部電力原子力安全技術研究所公募研究で行われている。

キーワード: 津波, 電離圏, 全電子数  
Keywords: Tsunami, Tsunamigenic ionospheric hole, Total electron content

## 非一様薄層導体近似を用いた三次元津波ダイナモ数値シミュレーション 3D numerical simulation of the tsunami-generated electromagnetic field using non-uniform thin-sheet approximation

川嶋 一生<sup>1\*</sup>; 藤 浩明<sup>2</sup>

KAWASHIMA, Issei<sup>1\*</sup>; TOH, Hiroaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻地球物理学教室太陽惑星系電磁気学講座, <sup>2</sup> 京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>2</sup>Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

A large ( $M_w=8.1$ ) tsunamigenic earthquake occurred along the Kuril-Kamchatka trench on 13 January 2007. This event was of normal fault type (Ji, 2007; Yagi, 2007; Yamanaka, 2007; Lay et al., 2009) and was considered to be strongly associated with another tsunamigenic earthquake of thrust fault type that occurred on the landward slope of the trench on 15 November 2006. The 2007 fault geometry, however, was uncertain in the sense that the dipping direction (southeast or northwest) was not determined by previous reports so far (e.g., Yamanaka, 2007; Lay et al., 2009).

The 2007 tsunami propagated through the Pacific Ocean and was observed at many tide gauge stations, seafloor tsunami sensors and the Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunami (DART) system. Fujii and Satake (2008) estimated the slip distributions for this tsunami by waveform inversions and revealed insignificant difference between the two fault dips. Our seafloor electromagnetic (EM) station successfully observed tsunami-generated EM variations approximately one hour after arrival of seismic waves (Toh et al., 2011). The EM variations were generated by the coupling of the particle motion of conductive sea water with geomagnetic main field during tsunami passage. Some numerical simulations of the so-called motional induction process, viz., the tsunami dynamo effect, were conducted in two-dimensional (2-D) time domain (Minami and Toh, 2013) and three-dimensional (3-D) frequency domain (Zhang et al., 2014).

In this study, we introduced a 3-D non-uniform thin-sheet approximation proposed by McKirdy, Weaver and Dawson (1985). We newly developed a 3-D frequency domain code to calculate the tsunami dynamo effect, which was able to represent actual bathymetry by lateral conductance distribution within the surface thin-sheet without introducing many vertical grids in the ocean.

We applied this method to calculate the EM variations generated by tsunamis of the 2007 Kuril earthquake and estimated the slip distributions for both fault dips. As for kinetic tsunami propagation simulation, we used the linear Boussinesq approximation in order to reproduce subsequent phases after the tsunami first arrival. As for inversion, we used a non-negative least square method to fit the observed downward magnetic component as well as to avoid negative slips on the fault plane.

Our calculations indicate that the southeast-dipping fault model explains the observed downward magnetic component better than the northwest-dipping fault model. We also confirmed that the observed subsequent phases were produced by the frequency dispersion effect of the tsunami waves. The variance ratio (1.83) for the downward magnetic component by the two fault models was smaller than the critical F-value of 1.84 corresponding to 95% confidence level, although it passed the 90% confidence level. This may be attributed to too few observed data by the sparse sampling rate (2min). Use of more data such as the other tsunami-generated EM components can lead to determination of fault models with more accuracy. However, our calculation suggests that EM observations are sensitive enough to estimate the slip distribution on fault planes and can contribute to seismology.

キーワード: 津波, ダイナモ効果

Keywords: Tsunami, Dynamo effect

## 三次元津波電磁場シミュレーションによる海底津波電磁場データの再現 Three-dimensional simulation of the tsunami-generated magnetic fields: reproduction of seafloor tsunami magnetic signals

南 拓人<sup>1\*</sup>; 藤 浩明<sup>1</sup>; 市原 寛<sup>2</sup>  
MINAMI, Takuto<sup>1\*</sup>; TOH, Hiroaki<sup>1</sup>; ICHIHARA, Hiroshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構  
<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>2</sup> JAMSTEC

良導体である海水が地球主磁場中を運動すると、海水中に電流を流し二次磁場を発生させる。この現象は津波電磁場現象と呼ばれ、2010年チリ地震や2011年東北地方太平洋沖地震など近年の巨大地震津波の発生以降、関連する海底・陸域電磁場データが数多く報告されてきた (e.g., Minami et al., 2013)。津波電磁場現象は、津波の早期警戒、津波現象の解析、及び、電気伝導度構造推定への応用が期待されているが、いずれの目的においても、実海底地形と海底下の電気伝導度構造を考慮し、津波の過渡的性質を再現できる、精度の高い津波電磁場シミュレーションコードが必要となる。

本研究では、これらへの応用を目指し、時間領域の三次元津波電磁場シミュレーションコードを開発した。本コードでは、時間領域の有限要素法を非構造四面体要素と共に採用している。四面体要素は、直方体要素を用いる三次元数値計算手法に比べて、精度の高い地形表現が可能である。本シミュレーションでは、まず、渦なしの非圧縮流体を仮定し、速度ポテンシャルに関するラプラス方程式を線形境界条件と共に解くことで、津波伝搬を計算する。次に、得られた津波速度場をソースとして磁場の誘導方程式を解き、津波によって誘導される電磁場を計算する。流体計算と電磁場計算において同じ四面体メッシュを用いることで、自己無撞着な結果が得られる点に本シミュレーションの利点がある。

本研究では、このコードを用いて、Satake et al. (2013) の波源モデルを初期条件とした、2011年東北地震津波の三次元シミュレーションを行った。その結果、日本海溝東側の海底観測点における津波磁場データが十分に再現できないこと、特に、位相が概ね一致する一方で、計算された磁場の振幅が実データに比べて小さくなることが明らかとなった。この結果は、2011年東北地震津波の波源モデルを、津波電磁場データを用いて改良できる可能性を示唆している。

本発表では、本研究で開発した津波電磁場の三次元シミュレーション手法、及び、2011年東北地方太平洋沖地震津波を対象としたシミュレーション結果と海底磁場データの比較結果を報告する。またこれに加え、海底津波磁場データを説明可能な、2011年東北地震津波の波源モデルについて議論する予定である。

キーワード: 三次元シミュレーション, 有限要素法, 津波, 磁場, 四面体要素, 時間領域

Keywords: three dimensional simulation, finite element method, tsunami, magnetic field, tetrahedral elements, time domain

## 宝永地震(1707)および安政南海地震(1854)の豊後水道両岸での津波の高さ分布 Tsunami Heights of the 1707 Hōei and the 1854 Ansei -Nankai earthquakes on the coasts of the Bungo straits

都司 嘉宣<sup>1\*</sup>; 岩瀬 浩之<sup>2</sup>; 森谷 拓実<sup>2</sup>; 今井 健太郎<sup>3</sup>; 佐藤 雅美<sup>3</sup>; 芳賀 弥生<sup>3</sup>; 今村 文彦<sup>3</sup>  
TSUJI, Yoshinobu<sup>1\*</sup>; IWASE, Hiroyuki<sup>2</sup>; MORIYA, Takumi<sup>2</sup>; IMAI, Kentaro<sup>3</sup>; SATO, Masami<sup>3</sup>;  
HAGA, Yayoi<sup>3</sup>; IMAMURA, Fumihiko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 深田地質研究所, <sup>2</sup> (株) エコー, <sup>3</sup> 東北大災害科学国際研究所

<sup>1</sup>Fukada Geol. Inst., <sup>2</sup>Ecoh Co. Ltd., <sup>3</sup>IRIDeS, Tohoku Univ.

豊後水道の両岸の四国・愛媛県、九州・大分県、宮崎県の海岸で、安政南海地震(1854)、および宝永地震(1707)の津波浸水、および遡上高さの調査を行った。豊後水道両岸にわたる計測器械による全面的な測定調査はこれまで全く行われたことがなかった。愛媛県側における一連の南海地震による津波被害は、主として佐田岬半島以南の直接太平洋に面した豊後水道沿岸で発生していて、それ以北の周防灘、瀬戸内海の海岸は津波の被害はそれほど大きくはなかった(羽鳥、1988)。このため、われわれは、愛媛県側は佐田岬半島以南、九州側は別府湾以南について現地調査を行った。愛媛県のこの範囲は、江戸時代にはほぼ宇和島藩に属していた。したがって、『大控』などの信頼性の高い同藩の公的文書を基本にして調査することが出来た。愛媛県の調査は2015年1月22日から24日にかけて行った。九州海岸での測定結果を合わせて、津波高さの分布図を示す。安政南海地震の津波では、愛媛県では最南部にある愛南町でもっとも津波浸水高さが大きく、深浦で5.6m、約100軒中70軒が流失した。また下久家(しもひさげ)で6.3m、全戸流失と記録されている。宇和島城下では、おおむね浸水高さは3~4mであり、標高の高い南部の市街地を除いて城下の市街地の70%ほどが浸水したと推定される。宇和島市中心街の北方にある吉田は、宇和島の支藩・吉田藩の陣屋が置かれていたが、港近くの街区にあった庄屋赤松家の居宅の「鴨居」に海水がついたと『赤松家庄屋記録』に記され、ここでは浸水高さは4.3mと測定された。八幡浜市保内の三嶋神社は海岸から約1.5kmにあるが、六百石船がこの鳥居前まで運ばれたと記録され、ここでも5.1mの浸水高さがあったことが判明した。宝永地震の津波では、宇和島城下では『記録書抜』に家老・桜田数馬の邸宅(堀端町)の玄関前に浸水した、との記載から、津波浸水高さは最低6.0mあったことが確実である。すなわち宝永津波は安政津波よりさらに2~3m浸水高さが大きかったことが判明した。安政南海地震の津波の大分県の記録では、佐伯藩主毛利家の『寅十一月五日七日両度大地震且高汐による損所覚』に現在の佐伯城下から宮崎県境までの海岸線にある21ヶ所の集落について、被災家屋数、人的被害数、田畑の浸水被害面積などの数字が詳細に記録されている。一方、平凡社(1997)の「日本歴史地名大系・大分県」によって、これらの集落の江戸時代の総家数、全田畑面積を知ることができる。さらに明治30~40年代に発行された五万分の一地図によって、およその浸水範囲を知ることができる。大分県、宮崎県の海岸の現地調査は2014年11月25日から28日にかけて行った。その結果を図に示す。図中の数字はすべてTP基準で測定した津波浸水高さであって、津波遡上高さではない。佐伯城下市街地では安政南海地震の津波高さはおおむね3mであった。佐伯の南の旧米水津(よのうず)村と蒲江(かまえ)町の地域で津波高さが大きく、米水津の大浦で7.0m、蒲江の竹野浦、丸市で各7.1mであった。九州での宝永地震の津波はやはり米水津で大きく浦代で11.5mであったことが知られている(千田ら、2004)。宝永地震津波では、大分市原で7.4m、鶴崎で4m、佐伯城下の大手前で3.7mであって、これらの場所でも安政南海地震の浸水高さより大きかったことが判明した。

本稿は、原子力規制庁からの委託業務「平成26年度原子力施設等防災対策等委託費(津波痕跡データベースの高度化)事業」(代表:東北大学 今村文彦)の成果の一部を取りまとめたものである。

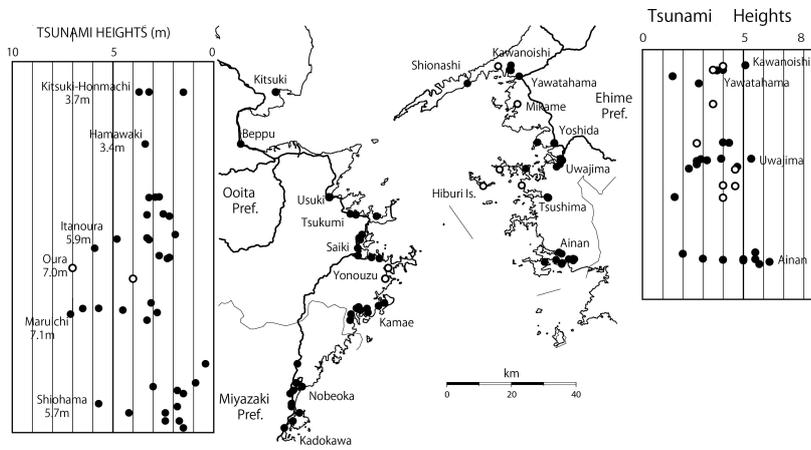
キーワード: 安政南海地震津波, 宝永地震津波, 豊後水道, 愛媛県, 大分県, 宮崎県

Keywords: the 1854 Ansei Nankai Earthquake-Tsunami, the 1707 Hōei Earthquake-Tsunami, Bungo straits, Ehime prefecture, Oita prefecture, Miyazaki prefecture

HDS27-14

会場:A04

時間:5月27日 15:00-15:15



## 2011年太平洋沖東北津波の検潮観測により明らかにされたチリ、ハワイ諸島からの反射波の最大水位分布 Maximum-level distributions of reflected waves from Chile and Hawaiian Islands in the 2011 Tohoku Tsunami.

阿部 邦昭<sup>1\*</sup>; 岡田 正実<sup>2</sup>; 林 豊<sup>2</sup>  
ABE, Kuniaki<sup>1\*</sup>; OKADA, Masami<sup>2</sup>; HAYASHI, Yutaka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> なし, <sup>2</sup> 気象研究所

<sup>1</sup> none, <sup>2</sup> MRI

(はじめに) 2011年東北沖太平洋津波の反射波を検潮記録から抽出し、その最大水位の空間分布を調べた。卓越する反射波は振幅の大きい場所から放射されるとすると、ハワイ諸島、チリ、カリフォルニア海岸などが候補になる。これらの候補地を反射波の波源として伝播図を作成し、走時を計算すると、津波波形で振幅が増大する時刻にほぼ合致することが認められる。著者らはこの方法でチリの反射波が日本に到達したことを指摘してきた(岡田他、2014)。今回、この解析を全太平洋に拡大し、チリ以外の反射波も含めてその空間分布の性質を調べた。

(方法) 使用したデータはITICによってまとめられた3月11日から13日までの3日間の1分間隔デジタルデータである。この中から地域的な偏りがないように66点を選び、発震時から64.3時間の水位記録を取り出し、潮汐を数値フィルターで除外して津波波形とした。反射波の開始点はチリの場合はチリ中央部海岸、ハワイ諸島の場合はミッドウェイ島とした。継続時間として、前者の場合はチリ中央部バルパライソの初動から最大波までの時間の5.9時間を、後者はミッドウェイ島とハワイ島からの反射波の到来の時間差を用いた。後者では観測点の方位によって継続時間が異なる。これらの時間内で得られた最大水位を反射波の最大水位としてこれを求め、その空間分布の特徴を調べた。

(結果) チリからの反射波において、最大水位を3階級に分類して地図上に示したのが図1である。震央は星で、反射体の位置は点線で示してある。これをみると反射波は中央アメリカの太平洋海岸にむけて強く放射される一方、ハワイ諸島、日本、ニュージーランドにも大きなエネルギーを伝えている。しかし日本でも串本、尾鷲では振幅が大きいのに、土佐清水、花咲では小さい。これら一連の事実を矛盾なく説明するには分布の仕方だけでなく、島の中の観測点の位置、固有周期などの要素を考慮する必要がある。一方、ハワイ諸島の反射波は日本や中南米で最大値が大きく、これはハワイ諸島の延びる方向の延長線方向にあたっている。これに対し直交する方向では卓越した場所が少ない。延長線方向は波源に直交する方向でもあるので、コヒーレントな波が放射された方向である。したがって、ハワイ諸島は来る波に対しては反射・散乱体として作用し、通過する波に対してはレンズ効果を発揮して、この方向で振幅を増加させるよう働いた。なお延長線方向から隔たったアリューシャン列島西部、パプアニューギニアでも反射が卓越した事を指摘しておく。この2つの反射波の他に、カリフォルニア海岸、アリューシャン列島、パプアニューギニアなどからの反射波が観測されたことを、同じ議論によって説明できる。

キーワード: 2011年太平洋沖東北津波, 反射波, 最大水位, チリ, ハワイ諸島

Keywords: 2011Tohoku Tsunami, maximum level, reflected wave, Chile, Hawaiian Islands

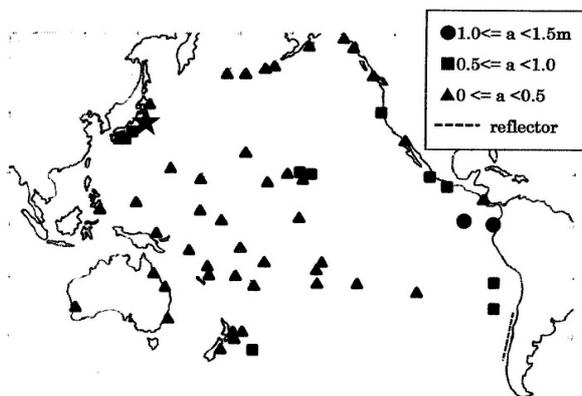


Fig. 1

## 東京湾内外の津波高さ分布・周期特性と東京湾・相模湾の固有振動 Tsunami Heights and Period Distribution of Tokyo Bay and Characteristic Oscillation of Tokyo and Sagami Bays

瀧川 朗<sup>1</sup>; 室谷 智子<sup>1</sup>; Heidarzadeh Mohammad<sup>1</sup>; Wu Yifei<sup>1</sup>; 佐竹 健治<sup>1\*</sup>  
TAKIGAWA, Akira<sup>1</sup>; MUROTANI, Satoko<sup>1</sup>; HEIDARZADEH, Mohammad<sup>1</sup>; WU, Yifei<sup>1</sup>; SATAKE, Kenji<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Earthquake Res Inst, Univ Tokyo

東京湾ではこれまで地震による津波が度々観測されてきたが、1923年大正関東地震（以下、関東地震）のような震源域が湾内にも存在する近傍の地震と、2011年東北地方太平洋沖地震（以下、東北地震）のような遠地で発生する地震とでは、湾内外の波高分布が異なることが知られている（渡辺、1970）。関東地震では湾内で津波が大きく減衰し、湾奥の波高が湾外よりも顕著に小さかった（羽鳥ほか、1973）が、東北地震では減衰が小さくそれらの波高が同程度であった（Sasaki et al., 2012, 都司ほか、2011）。一般的な湾における津波波高は入射波の周期と湾の固有振動周期との関係によって決まる（Watanabe, 1962）ため、両者の特徴を知ることが将来発生する津波を評価する上で重要である。そこで本研究では東京湾・相模湾における津波の周波数解析と固有振動計算を行い、上記2つの地震津波の湾内での減衰の違いについて考察した。

まず関東地震・東北地震の両津波について、観測波形およびシミュレーションによる再現波形（関東地震は Sato et al. (2005)、東北地震は Satake et al. (2013) の断層モデルから計算した。）のスペクトル解析を行い、卓越周期を特定した。その結果、津波の卓越周期が2つの地震で異なること、また同じ地震でも東京湾外（相模湾周辺海域）と湾内では卓越周期が異なることがわかった。具体的には、関東地震では湾外で70分と30~40分、湾内で110分の周期が卓越したのに対し、東北地震では湾外で60~70分、湾内で60~70分と110分の周期が卓越した。これらの卓越周期は各海域での波高に大きく寄与しており、特に関東地震では湾外の第一波に含まれる40分以下の短周期成分が湾口付近の神奈川県久里浜―千葉県金谷を結ぶ境界で弱まったことが、振幅の減衰に影響していた。なお、この境界は湾に進入する過程で水深が急激に浅くなる場所である。

次に東京湾・相模湾の固有振動を計算した。これまで東京湾の固有振動は相田（1996）によって計算されていたが、相模湾の固有振動は未だ固有値問題として解かれていなかった。最近になって、今井ほか（2014）が津波シミュレーションから東京湾手前の相模湾の固有振動（周期約70分）の存在と、それが東京湾の振動に与える影響を指摘している。我々は東京湾・相模湾を含む広い海域を対象として、線形浅水波方程式を差分化する Loomis（1975）と同様の手法で作成した固有値問題を解いた。その結果、得られたモードの多くが東京湾内のみで特徴づけられるもの（例：周期112分のモード）であったが、東京湾外のみが振動するものや東京湾内外が連動するもの（例：周期72分のモード）も少数であるが確認された。これらのモードを周波数解析で得られた卓越周期およびその分布と比較すると、110分と70分の卓越周期は固有振動が励起されたものとして説明できることがわかった。一方、関東地震において湾外で卓越した周期30~40分の成分が境界で減衰することについては、対応するモードが見られず固有振動では説明できなかった。

今回の結果から2つの地震津波の東京湾内での波高分布の違いの原因について推論すると、以下のようなになる。まず関東地震では、湾外で40分以下の短周期成分が高い振幅に貢献していたが、湾口付近でそれが大きく減衰し波高も小さくなった。これは固有振動では説明できなかったが、水深が急激に浅くなる場所での波の反射の影響（渡辺、1970）が考えられる。一方東北地震では、湾外での卓越周期が既に70分程度であり、それが湾内外が連動する固有振動の周期（72分）と近いものであったため、湾内に振動が伝わりやすかったと考えられる。

キーワード: 津波スペクトル解析, 固有振動, 東京湾, 相模湾, 1923年大正関東地震, 2011年東北地方太平洋沖地震

Keywords: Tsunami spectral analysis, Characteristic oscillation, Tokyo Bay, Sagami Bay, 1923 Kanto earthquake, 2011 Tohoku earthquake

## 東北地方太平洋沖地震で励起された沿岸近傍の地盤変動による初期水位変動 Small-amplitude water oscillation near the coast generated by local crustal deformation of the 2011 Tohoku earthquake

鬼頭直<sup>1\*</sup>; 根本信<sup>1</sup>; 長田正樹<sup>2</sup>; 平田賢治<sup>2</sup>

KITO, Tadashi<sup>1\*</sup>; NEMOTO, Makoto<sup>1</sup>; OSADA, Masaki<sup>2</sup>; HIRATA, Kenji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 応用地質株式会社, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>OYO Corporation, <sup>2</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

Small-amplitude water oscillation is observed at several tsunami stations along the Pacific coast of the Tohoku region just after the origin time of the 2011 Tohoku earthquake and before arrivals of main tsunami waves. To investigate the cause of the small-amplitude water oscillation, we focus on the tsunami wave data recorded at the huge tsunami meters deployed by the Japan Meteorological Agency (JMA). We selected the data sets observed at the 3 stations (Miyako, Ofunato and Ayukawa) where the amplitude of the water oscillation is relatively high and waveforms are reasonably clear. The maximum amplitude of the water oscillation observed at the selected stations is about 50 cm, and the dominant period ranges from 60 s to 300 s.

Synthetic tsunami waveforms were calculated for the above-mentioned 3 stations using a tsunami simulation code in order to compare the observed waveforms of the water oscillation with the calculated ones. Firstly, uniformly distributed crustal displacement was assigned to all the mesh cells in the 50 m mesh-sized areas. The given crustal displacement changes in the time domain for 30 s based on the horizontal displacement of the GEONET data by Geospatial Information Authority of Japan (GSI) with the sampling rate of 1 s. The displacement data are obtained from the nearest GEONET station to each tsunami station (Miyako, Ofunato and Ayukawa). Second, tsunami simulation was carried out based on the non-linear shallow water theory using the created crustal deformation data and tsunami waveforms were calculated at the selected tsunami stations. Finally, a band-pass filter was applied to the calculated tsunami waveforms and the observed ones to alleviate the contamination of short-period noise and the long-period trend related to the main tsunami waves. Cross-correlation coefficients between the calculated tsunami waveforms and the observed ones were subsequently calculated to estimate the coherency of those waveforms.

A comparison of the calculated waveforms and the observed ones indicates that the observed small-amplitude water oscillation may be generated by the horizontal displacement near the Pacific coast in the Tohoku region due to faulting of the 2011 Tohoku earthquake. In addition to the similarity between calculated waveforms and observed ones, the dominant period of the observed water oscillation is consistent with the theoretically calculated natural period of water oscillation trapped in the bay. Since relatively small earthquakes along the plate boundary do not produce such large crustal deformation near the coast, this phenomenon may be characteristic of great earthquakes such as the 2011 Tohoku earthquake.

## 近地海底圧力観測記録によって推定した2012年12月7日三陸沖地震 (Mw7.3) に伴う津波の波源 Tsunami source of the earthquake doublet on Dec. 7 2012 derived from near-field records by ocean bottom pressure gauges

久保田 達矢<sup>1\*</sup>; 日野 亮太<sup>2</sup>; 太田 雄策<sup>1</sup>; 鈴木 秀市<sup>1</sup>; 稲津 大祐<sup>3</sup>  
KUBOTA, Tatsuya<sup>1\*</sup>; HINO, Ryota<sup>2</sup>; OHTA, Yusaku<sup>1</sup>; SUZUKI, Syuichi<sup>1</sup>; INAZU, Daisuke<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>3</sup> 東京大学海洋アライアンス

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University,

<sup>3</sup>UTokyo Ocean Alliance, The University of Tokyo

2012年12月7日、三陸沖の海溝軸付近の太平洋プレート内において2つの地震が立て続けに発生した。2つの地震の規模はいずれも Mw 7.2 で、先行した地震は逆断層型の発震機構をもち震源の深さは約 55 km、2つ目は正断層型で深さ約 20 km と推定されている。しかし、地震波解析に基づく震源断層の位置の推定誤差は大きく、2つの地震のセントロイドの位置については、2つ目の地震が海溝軸より陸側で起こったとする解 (Global CMT; JMA) と、海側で起こったとする解 (Lay et al., 2013; Harada et al., 2013) が示されている。この地震に伴う津波は、東北大学が震源付近の日本海溝の海溝軸から陸側斜面の海域に展開していた 17 台の海底圧力計により観測されている。震源直近で観測された津波の波形を解析することによって、これら2つの地震の震源位置の推定精度を大幅に改善することができれば、この特異な連続地震の発生過程の理解にも貢献できると期待される。これまでに得られた CMT 解に基づいて津波をフォワード計算した結果、2つ目の地震が海溝軸より陸側で起こったとする Global CMT から計算される海底上下動分布から計算した津波波群が近地観測で得られた波形をもっともよく再現した。遠地津波波群の解析により推定された津波波源モデル (Inazu and Saito, 2014) をもとに近地津波を計算したところ、近地で観測される津波波群の到達時刻をおおよそ説明できるが、計算振幅が観測された振幅に比べて過小となることがわかった。一方で、近地津波波群のみを用いて初期波高分布の逆解析を行ってみると、震源域直上の隆起・沈降のパターンは、フォワード計算で遠地津波波群の再現性が良かった Inazu and Saito (2014) による波高分布および Global CMT 解から期待される波高分布とよく一致した。また、DART で観測された遠地津波波群の位相を非常によく再現する一方で、振幅の再現性はあまり良くなかった。これらの結果は、Global CMT 解や Inazu and Saito (2014) によって推定された断層あるいは波源の水平位置が、近地で観測された津波波群と調和的であることを示す一方で、津波振幅に寄与する断層の深さやすべり量については、改善の余地が残されていることを意味する。今後は、震源直上で得られた海底圧力計が捉えた地震時静的変化の信頼性を精査するとともに、遠地津波波群を逆解析に用いることで、信頼できる津波波源モデルを構築する予定である。

キーワード: 津波, ダブル地震, 津波波源モデル, 海底圧力計

Keywords: tsunami, doublet earthquake, tsunami source model, ocean bottom pressure gauge

## 2014年4月1日チリ北部地震津波の規模 Magnitude of the North Chile Earthquake Tsunami of April 1, 2014

羽鳥 徳太郎<sup>1\*</sup>  
HATORI, Tokutaro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> なし

<sup>1</sup>None

2014年4月1日23時46分(UTC)に、チリ北部でM8.2の大地震が空白域で発生した。津波が太平洋全域で観測され、最大波の片振幅値は震源付近のイキケ184cm、アリカ200cmであった。また、4月3日の余震(M7.7)も津波を伴った(アリカ74cm, イキケ48cm)。なお、3月16日にイキケ付近に前震(M6.7)があり、小津波を伴った。本稿では、検潮記録(NOAA)をもとに、津波の規模、波源域や伝播の状況を解析し、周辺域の津波と比較検討する。

各観測点からの逆伝播図によれば、波源域はチリ北部沿岸にそい、南北に長さ400kmと推定され、1877年津波( $m=4$ )の波源域と重なる(三陸・房総に浸水被害をもたらした)。震源周辺の5記録の津波初動は押し波であり、海底の隆起を示唆する。震央距離と波高の関係図によれば、津波マグニチュードは本震： $m=3$ 、余震： $m=2$ と判定され、地震の規模と比べて標準値である。

太平洋域の波高分布で偏差をみると、チリ沿岸のアリカ・イキケは標準的である。北米沿岸ではクレセントシティ16cmが標準的、そのほか下回る地点が多い。ハワイと仏領ポリネシアで60cm前後が大きい。日本沿岸の津波は、発震時から21—23時間後に観測された。岩手県久慈で55cmが突出し、そのほかの地点では8—25cmにとどまった。以上、今回の津波規模は1868年ペルー、1877年の津波より小さく、今後もチリ北部の地震活動に注視したい。

キーワード: 津波規模, 津波波源域, 津波伝播状況

Keywords: Tsunami source area, Tsunami magnitude, Distribution of tsunami heights

## 南海トラフにおける確率論的津波ハザード評価のための特性化波源断層モデル群の設定について A set of characterized earthquake fault models for the probabilistic tsunami hazard assessment in the Nankai Trough

遠山 信彦<sup>1\*</sup>; 平田 賢治<sup>1</sup>; 藤原 広行<sup>1</sup>; 中村 洋光<sup>1</sup>; 森川 信之<sup>1</sup>; 長田 正樹<sup>1</sup>; 松山 尚典<sup>2</sup>; 鬼頭 直<sup>2</sup>;  
村嶋 陽一<sup>3</sup>; 秋山 伸一<sup>4</sup>  
TOYAMA, Nobuhiko<sup>1\*</sup>; HIRATA, Kenji<sup>1</sup>; FUJIWARA, Hiroyuki<sup>1</sup>; NAKAMURA, Hiromitsu<sup>1</sup>;  
MORIKAWA, Nobuyuki<sup>1</sup>; OSADA, Masaki<sup>1</sup>; MATSUYAMA, Hisanori<sup>2</sup>; KITO, Tadashi<sup>2</sup>; MURASHIMA, Yoichi<sup>3</sup>;  
AKIYAMA, Shinichi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup> 応用地質株式会社, <sup>3</sup> 国際航業株式会社, <sup>4</sup> 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社  
<sup>1</sup>NIED, <sup>2</sup>OYO CORPORATION, <sup>3</sup>KOKUSAI KOGYO CO., LTD., <sup>4</sup>CTC (ITOCHU Techno-Solutions Corporation)

日本全国を対象とした津波ハザード評価(藤原・他、2013、連合大会; 平田・他、2014、連合大会)のうち、「確率論的津波ハザード評価」のための津波シミュレーションには、将来起こり得る全ての地震を対象とする各種不確かさを考慮した特性化波源断層モデル群が必要である。その津波波源設定の考え方と日本海溝周辺で発生する地震を対象とした特性化波源断層モデル群の設定例を遠山・他(2014、連合大会)で紹介した。

ここでは、東北地方太平洋沖型地震を踏まえて改訂された地震調査研究推進本部による「南海トラフの地震活動の長期評価(第二版)について」(平成25年5月24日)を参考に南海トラフにおいて特性化波源断層モデル群を設定したので、その考え方と共に紹介する。

最初に、津波を発生させる地震を南海トラフの長期評価で示された評価対象領域に基づき各領域の組合せによる震源断層が特定できる地震とそれ以外の震源断層を予め特定しにくい地震に分類する。

さらに、震源断層が特定できる地震における津波波源のモデルは、①「基本(代表)モデル」: 過去に発生した大地震の大すべり域の位置を参考にし、後述する特性化のルール a) に従って大すべり域を配置した特性化波源断層モデル群、②「拡張モデル」: 大すべり域の位置について多様性を考慮した後述する特性化のルール a) から e) に基づく特性化波源断層モデル群として設定した。

なお、これらに加え、過去に発生した大地震についての研究例に基づいて、歴史地震津波に相当する震源域とその大すべり域の面積と位置を単純化したものを「再現モデル」として設定した。想定する地震の数としては、長期評価に示された15種類の地震に、発生しうると考えられる70種類の地震を追加して併せて85となった。

個別の特性化波源断層モデルの設定に際しては、巨視的パラメータとして断層面積  $S$  から地震モーメント  $M_0$  を求める。 $M_0$  と  $S$  の関係式は、内閣府の「南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告)」(2012)等を参照し、応力降下量 3MPa 相当の関係式を使用した。剛性率  $\mu$  は浅部で小さく深部では大きいという研究事例があるが、ここでは  $5 \times 10^{10}$  (N/m<sup>2</sup>) で深さに関わらず一様と仮定した。

微視的パラメータの大すべり域、超大すべり域のすべり不均質については、日本海溝沿いの地震に対する津波波源断層モデルの特性化方法と同様に、a) 大すべり域は平均すべり量の2倍の領域とし、その面積は断層全体の面積の30% (是永・他、2014、連合大会)、b) 大すべり域を海溝軸方向におよそハーフピッチでずらして網羅的に配置し、海溝軸と直交方向には浅部、中央部、深部の3領域から構成される組合せを基本、c) 大すべり域が海溝軸沿いに配置される場合は超大すべり域(平均すべり量の4倍)も設定、d) 設定する大すべり域の重複率(互いに重なる面積比率)はおおよそ  $1/2 \sim 3/4$ 、e) 超大すべり域を設定する場合は、超大すべり域の重複率が約半分とした。

但し、震源断層を予め特定しにくい地震では、断層中央にのみ大すべり域を設定する標準(平均)的なケースのみを特性化波源断層モデル群に含める。標準的ケース以外の大すべり域の配置パターンについては、個々の特性化波源断層モデルから計算された津波高さを確率論的に統合する時にすべり不均質パターンの不確実性として考慮する(藤原・他、2013、連合大会; 平田・他、2014、連合大会)。

以上のようにして南海トラフ領域において特性化波源断層モデル群を設定した結果、地震規模  $M_w$  7.7 から 9.2 までの85種類の地震について合計4000弱のモデル数となった。現在、これらのモデル群について、個別に津波シミュレーションを実施し、地震の発生確率やそれに基づく沿岸での津波高さについての確率論的津波ハザードの評価などを検討しているところである。

本研究は、防災科学技術研究所の運営費交付金研究プロジェクトの一環として実施された。

キーワード: 津波ハザード評価, 確率, 特性化波源断層モデル, 南海トラフ

Keywords: tsunami hazard assessment, probability, characterized earthquake fault model, Nankai Trough

## 境界積分によって求められる海底の地盤変位を用いた津波解析 Tsunami simulation using seabed displacement due to fault slip obtained by boundary integration

秋山 伸一<sup>1\*</sup>; 藤原 広行<sup>2</sup>; 橋本 紀彦<sup>1</sup>; 是永 真理子<sup>1</sup>; 阿部 雄太<sup>1</sup>; 松山 尚典<sup>3</sup>; 村嶋 陽一<sup>4</sup>  
AKIYAMA, Shinichi<sup>1\*</sup>; FUJIWARA, Hiroyuki<sup>2</sup>; HASHIMOTO, Norihiko<sup>1</sup>; KORENAGA, Mariko<sup>1</sup>; ABE, Yuta<sup>1</sup>;  
MATSUYAMA, Hisanori<sup>3</sup>; MURASHIMA, Yoichi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社, <sup>2</sup> 独立行政法人防災科学技術研究所, <sup>3</sup> 応用地質株式会社, <sup>4</sup> 国際航業株式会社  
<sup>1</sup> ITOCHU Techno-Solutions Corporation, <sup>2</sup> National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, <sup>3</sup> OYO Corporation, <sup>4</sup> KOKUSAI KOGYO CO., LTD

地震によって発生する津波の計算では、断層運動によって現れる海底面の鉛直変位を津波の初期水位と見なすことが多い。このような海底地盤の変位を求めるには、半無限弾性体内部の矩形断層運動によって現れる変位の解析解 (Okada, 1985) が広く用いられている。

これに対し、著者らは境界積分による海底地盤の変位計算法を開発した (秋山他、2014)。この方法は、海底地盤を半無限弾性体と仮定することにより自由表面の境界条件を満足する Green 関数を用いることで海底面の変位を断層面における境界積分のみで求められ、さらに、不規則な形状を有する断層面を忠実にモデル化できるといった利点がある。ただし、断層面が浅い場合には Green 関数の特異性が現れやすくなるが、PART 法 (Hayami and Brebbia, 1988) を用いることによってほぼ完璧にこの特異性を除去できる点も本手法の大きな特徴である。

本研究では、日本周辺のプレート境界で発生する地震を対象に、境界積分と Okada の解析解を用いてプレート境界での断層運動に伴う海底地盤の変位を求め、両者を比較する。さらに、これらの海底変位を初期水位と見なした津波解析を実施し、両者の差異について検討を加える。

なお、本研究は、防災科研で進められている「全国を対象とした津波ハザード評価」の一環として実施した。

### 参考文献

- Okada, Y. (1985) Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75, 1435-1154.  
秋山、藤原、橋本 (2014) 境界積分を用いた断層運動による海底地盤変位の計算法、2014 年日本地球惑星連合大会、HDS27-14  
Hayami, K. and C.A. Brebbia (1988) Quadrature methods for singular and nearly singular integrals in 3-D boundary element method, (Invited paper), *Proc. 10th Int. Conf. on Boundary Elements, Southampton, Computational Mechanics Publication with Springer-Verlag, Vol. 1, pp. 237-264*

キーワード: 境界積分, プレート境界, 海底地盤変位, 津波解析

Keywords: boundary integration, plate boundary, seabed displacement, tsunami simulation

## 詳細な地形データを使った確率論的な津波浸水ハザード評価 Probabilistic tsunami inundation hazard assessment using detailed surface model

齊藤 龍<sup>1\*</sup>; 村嶋 陽一<sup>1</sup>; 村田 泰洋<sup>1</sup>; 井上 拓也<sup>1</sup>; 高山 淳平<sup>1</sup>; 秋山 伸一<sup>2</sup>; 松山 尚典<sup>3</sup>; 平田 賢治<sup>4</sup>;  
藤原 広行<sup>4</sup>

SAITO, Ryu<sup>1\*</sup>; MURASHIMA, Yoichi<sup>1</sup>; MURATA, Yasuhiro<sup>1</sup>; INOUE, Takuya<sup>1</sup>; TAKAYAMA, Jymnpei<sup>1</sup>;  
AKIYAMA, Shinichi<sup>2</sup>; MATSUYAMA, Hisanori<sup>3</sup>; HIRATA, Kenji<sup>4</sup>; FUJIWARA, Hiroyuki<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 国際航業株式会社, <sup>2</sup> 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社, <sup>3</sup> 応用地質株式会社, <sup>4</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>KOKUSAI KOGYO CO., LTD., <sup>2</sup>CTC (ITOCHU Techno-Solutions Corporation), <sup>3</sup>OYO Corporation, <sup>4</sup>NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention)

防災科研による日本周辺海域における津波ハザード評価の取り組みの一環として、地域詳細版の確率論的な津波浸水ハザード評価を検討した。津波遡上による浸水深のハザードを地域全域で詳細に定量化することで、地域の防災計画やリスク評価などへの利活用に貢献することを目的としている。

これまで、全国を概観した確率論的な津波ハザード評価では、津波波源となる可能性のある全ての震源を想定することで、日本全国の沿岸津波水位を確率論的に予測・評価することを試みている[平田・他、2014、連合大会]。陸域の最小計算格子サイズを50mで設定しているため、海岸や河川などの微地形や構造物などは正確に表現されない。地域の詳細な津波浸水ハザードを評価するためには、より正確で精緻な地形データを用いて津波の遡上計算を行うことが必要である。構造物を含む詳細な地形データで求める津波浸水ハザードと、構造物の無い場合の潜在的な津波浸水ハザードとを比較し評価することで、構造物の有無による浸水深のハザードの違いを定量化することができ、堤防などの有効性を示せる。

そこで本研究では、評価地域を限定したうえで、最小10m格子の地形データを使い津波伝播・遡上計算を多数の震源モデルで実施し、計算で得られる浸水深を使い地域の確率論的な津波浸水ハザード評価を試みた。ケーススタディとして陸前高田市市街地を対象地域とし、対象地域における、①構造物を除いた震災前の地形における潜在的な津波浸水ハザードと、②構造物を考慮した震災前の津波浸水ハザードとを比較し、構造物の有無による津波浸水ハザードを定量化した。想定した地震は、長期評価などにに基づき設定した全国概観版の確率論的な津波ハザード評価用の日本海溝の震源モデル1890シナリオ[遠山・他、2014、連合大会]である。陸域の地形を、東北地方太平洋沖地震以前に取得した航空レーザー測量データに基づき10m格子で作成した。また、堤防などの天端高を地形データへ組み込んだ。計算領域の格子幅を、外洋の最大2430m、浅海域と陸域の最小10mで設定し領域接続した。堤防などの越流破壊や構造物の破壊は、まず、構造物の破壊されない最小な浸水ハザードを、構造物の無い潜在的な浸水ハザードと比較するため、考慮しない。確率論的な津波浸水ハザード評価は、多数の震源モデルを使って求めた浸水深の頻度や浸水面積を、構造物の有無毎で定量化し検討した。その結果、詳細な地形データを使うことで、地域の津波浸水ハザードを10m格子毎に評価でき、低地や河川周辺など地域の詳細な特徴を反映した浸水深のハザード情報や堤防などの有効性を定量化することができた。

詳細な地形データを使った多数の震源モデルによる確率論的な浸水深計算は、不確実性を考慮した浸水深の予測検討[阿部・他、2014、連合大会]や、堤防より低い津波に不確実性を与えた場合の浸水深の予測検討などにも活用でき、より確からしい堤防などの有効性や費用対効果などの議論に貢献できると期待される。

キーワード: 津波, 浸水深, ハザード評価, 確率

Keywords: Tsunami, Inundation, Hazard assessment, Probability

## 確率論的津波ハザード評価における評価結果の統合方法の検討 Integration of hazard curves in Probabilistic Tsunami Hazard Assessment in Japan

阿部 雄太<sup>1\*</sup>; 是永 眞理子<sup>1</sup>; 秋山 伸一<sup>1</sup>; 松山 尚典<sup>2</sup>; 村嶋 陽一<sup>3</sup>; 藤原 広行<sup>4</sup>

ABE, Yuta<sup>1\*</sup>; KORENAGA, Mariko<sup>1</sup>; AKIYAMA, Shinichi<sup>1</sup>; MATSUYAMA, Hisanori<sup>2</sup>; MURASHIMA, Yoichi<sup>3</sup>; FUJIWARA, Hiroyuki<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 伊藤忠テクノソリューションズ, <sup>2</sup> 応用地質株式会社, <sup>3</sup> 国際航業株式会社, <sup>4</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup> ITOCHU Techno-Solutions Corporation, <sup>2</sup> OYO Corporation, <sup>3</sup> KOKUSAI KOGYO CO., LTD., <sup>4</sup> National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

確率論的津波ハザード評価では、様々な種類の地震によって生じる津波の危険性を評価するため、複数の波源モデル群を構築して数値シミュレーションにより津波水位を推定している。各波源モデルには、長期評価や過去の地震活動のデータを基にして発生確率を与え、これにより超過確率分布（以下、ハザードカーブ）が算定される。最後に全波源モデルのハザードカーブ群を統合することで、全ての想定しうる地震による評価結果が得られる。本研究では、「全国を対象とした津波ハザード評価」におけるハザードカーブ群の統合の考え方と「東北地方太平洋沖型の地震」を対象としたハザードカーブ算定の実施例について紹介し、各波源モデルに与える「重み」設定の妥当性について議論する。

「全国を対象とした津波ハザード評価」では、東北地方太平洋沖型の地震についての長期評価結果を基にし、地震のマグニチュードや、震源域の位置、すべり不均質性の不確実性を考慮して 106 個の波源モデルを設定している。ハザード評価結果を統合する際には、波源モデル群に対して重みを設定して津波水位の確率密度分布を算出し、これに地震の発生確率をかけて超過確率を求める。ここで、得られる確率密度分布の形状は重みの設定方針に大きく依存しているため、重み設定の妥当性の検討が重要となる。

本研究では、まず重み設定の方針として、「マグニチュードの不確実性について、重みは  $b$  値 0.9 の GR 則に従う」、「震源位置の不確実性について、重みは一様分布に従う」、「すべり不均質性について、重みは一様分布に従う」としたものを基本モデルとした。そして、日本海溝に面した沿岸一帯の確率密度分布を求め、その平均値および平均値+1  $\sigma$  の値と 2011 年東北地方太平洋沖地震の津波痕跡値との比較を行った。その結果、津波痕跡値の多くは平均値+1  $\sigma$  よりも大きい値となっており、基本モデルが過小評価となっていることが示唆された。次に、検討用モデルとして、「2011 年東北地方太平洋沖地震と同等の  $M_w9.1$  の地震にのみ重みを与える」としたモデル 1、「海溝軸付近に平均の 4 倍のすべり量のある地震にのみ重みを与える」としたモデル 2、モデル 1 と 2 の条件を共に満たすこととしたモデル 3 について、確率密度分布を求め津波痕跡値との比較を行った。その結果、モデル 1~3 の平均値および平均値+1  $\sigma$  の値は基本モデルよりも大きくなり、多くの津波痕跡値を平均値+1  $\sigma$  の範囲内で説明できることが分かった。

本研究は、防災科研において進められている「全国を対象とした津波ハザード評価」の一環として実施された。

キーワード: 津波, ハザード評価, 確率

Keywords: tsunami, hazard assessment, probability

## 巨大山体崩壊による津波発生リスクの検討—桜島崩壊シナリオにおける被害推計— Risk assessment of a tsunami caused by a large-scale sector collapse - Damage estimation of the Sakura-jima collapse -

柳澤 英明<sup>1\*</sup>

YANAGISAWA, Hideaki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東北学院大学教養学部地域構想学科

<sup>1</sup> Department of Regional Management, Faculty of Liberal Arts, Tohoku Gakuin University

火山活動によって山体が崩壊し海域に大量の土砂が流入すると、巨大な津波を発生させる場合がある。我が国では、江戸時代以降、少なくとも3回の山体崩壊による津波が発生しており、数百名以上の犠牲者がでていいる。そのうち最も大きな被害に至ったものは、寛政4年(1792)に雲仙火山の眉山崩壊に伴って発生した津波である。この津波は、島原半島および、その対岸の熊本に達し、1万5000人にも及ぶ犠牲者を出した。山体崩壊に伴う津波の発生頻度は地震性のもものと比較すると少ないものの、一度発生すると巨大な災害に発展する。100以上の活火山を有する我が国において、山体崩壊による津波発生リスクは、決して無視できるものではない。そこで本研究では、我が国における活火山を対象に、津波発生リスクの検討を行うとともに、リスクの高い山体について、山体崩壊とそれに伴う津波のシミュレーションを実施し、詳細な被害推計を行った。

まず津波の発生する可能性のある活火山を抽出するため、日本の活火山に対して、山体が崩壊した場合の土砂到達範囲を簡易式より算定した。そして、土砂到達範囲をGISでプロットし、海域データと重ねることで、崩壊土砂が海域にどの程度到達するかを検討した。さらに対象火山周辺の海岸における人口を検索することで、人的被害の発生しやすい火山を抽出した。以上の崩壊土砂の到達範囲と周辺人口に、活火山の活動度を考慮し、津波被害リスクの順位づけを行った結果、鹿児島県桜島におけるリスクが最も高いことがわかった。そこで次に、桜島を対象に山体崩壊とそれに伴う津波のシミュレーションを行い、詳細な検討を実施した。

桜島山体崩壊のシミュレーションには、柳澤ら(2014)による地すべり・津波統合モデルを用いた。崩壊土砂量については、1640年に北海道駒ヶ岳で発生した山体崩壊の土砂量を仮定した。シミュレーションの結果によると、桜島で山体崩壊が発生した場合、崩壊より3分後には、最悪1,000人以上が土砂に埋もれ、50m以上の津波が鹿児島市沿岸部に到達すると予測された。また、その津波による浸水範囲には、約16万世帯、34万人が含まれると試算された。現在、山体崩壊による津波の防災対策については、ほとんど検討されていないのが現状である。しかしながら、一度発生すると巨大な被害に至ることから、最悪のシナリオに備えた防災対策の検討も必要であるといえる。

キーワード: 津波, 山体崩壊, 地すべり, シミュレーション, 桜島, 被害推計

Keywords: Tsunami, Sector collapse, Landslide, Simulation, Sakura-jima, Damage estimation

## メルカリ震度による津波からの適切な避難方法 A proper method of Mercalli intensity-based evacuation from tsunami

林 豊<sup>1\*</sup>; 勝間田 明男<sup>1</sup>; 宮岡 一樹<sup>1</sup>; 対馬 弘晃<sup>1</sup>; CATALAN Patricio<sup>2</sup>; BAQUEDANO Jose<sup>2</sup>; ZELAYA Cecilia<sup>3</sup>; ORELLANA Victor<sup>4</sup>; 馬場 俊孝<sup>5</sup>  
HAYASHI, Yutaka<sup>1\*</sup>; KATSUMATA, Akio<sup>1</sup>; MIYAOKA, Kazuki<sup>1</sup>; TSUSHIMA, Hiroaki<sup>1</sup>; CATALAN, Patricio<sup>2</sup>; BAQUEDANO, Jose<sup>2</sup>; ZELAYA, Cecilia<sup>3</sup>; ORELLANA, Victor<sup>4</sup>; BABA, Toshitaka<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所, <sup>2</sup> フェデリコ・サンタマリア工科大学, <sup>3</sup> チリ海軍水路海洋部, <sup>4</sup> チリ内務省国家緊急対策室, <sup>5</sup> 徳島大学  
<sup>1</sup>Meteorological Research Institute, <sup>2</sup>Federico Santa Maria Technical University, <sup>3</sup>SHOA, Chilean Navy, <sup>4</sup>National Office of Emergency of the Interior Ministry, <sup>5</sup>Tokushima Univ.

Three national organizations in Chile cooperate for tsunami early warning operations. National Seismology Center, University of Chile (CSN) operates real-time seismic analysis, Hydrographic and Oceanographic Service of the Chilean Navy (SHOA) evaluates the necessity of tsunami alerts or alarms by using CSN data, and National Office of Emergency of the Interior Ministry (ONEMI) is the only responsible in disseminating warnings and prompting residents to evacuate directly. For example, after the Iquique earthquake on April 1, 2014 (moment magnitude ( $M_w$ ) 8.2 by CSN), a tsunami warning was issued for all coastlines of mainland Chile, because tsunami forecast areas have not been defined in Chile yet. Another example is the case of the earthquake on July 13, 2014 (at 4:56 p.m. local time; local magnitude (M) 5.6 by CSN); based on the MSI reports from the coastal cities, ONEMI issued precautionary evacuation of the coastal edges of Iquique, but it was soon canceled. It is found that this false alarm likely was caused by an inadequate standard procedure of Mercalli Scale Intensity (MSI)-based.

This paper shows that deriving an empirical relationship among MSI, epicentral distance ( $\Delta$ ), and M enable us to optimize the parameters of MSI-based precautionary evacuation, so that consistency between TFC-based warnings and MSI-based evacuation is assured.

The Japan Meteorological Agency (JMA) began operation of a quantitative tsunami warning system in 1999 (Kamigaichi, 2011); TFCs were used from 1977 to 1999. The version used from 1987 to 1999 has three curves relating  $\Delta$  and M, which were used as the thresholds between four tsunami warning categories (major tsunami, tsunami, tsunami advisory, and no tsunami).

After compiling data of the earthquake catalog by CSN, tsunami observation data by SHOA, and some additional tsunami numerical calculation, we can apply TFC. Then, an empirical equation among MSI,  $M_w$ , and  $\Delta$  (e.g.,  $MSI = a M_w - b \log_{10} \Delta + c$ , where  $a$ ,  $b$ , and  $c$  are constants) can be derived from MSI data collected by ONEMI and an earthquake catalog by CSN. When the range of precautionary evacuation by MSI-based method is defined "within  $r(M)$  km from any coast city in which MSI is  $s$  or higher", parameters  $r(M)$  and degree  $s$  can be determined almost equivalent to the curves of thresholds used in the TFC method. If M and MSI at a coastal area in concern are available, MSI-based method can be applied just after the earthquake. Duration of strong shake or MSI at remote cites can substitute M.

This indicates that optimization of parameters of the MSI-based method for consistency to the TFC method is promising approach to improve the reliability of early tsunami warnings in Chile. This methodology could also be applicable to other countries. By the way, the issue of real-time measurement and acquisition of objective MSI can be solved by tsunami alarm equipment (Katsumata *et al.*, in the same session).

Acknowledgements: This work is partly supported by SATREPS program by JICA and JST.

キーワード: チリ, 津波警報, 計測メルカリ震度, 予備的避難, 津波予報図

Keywords: Chile, early tsunami warning, instrumental Mercalli Scale Intensity, precautionary evacuation, tsunami forecast chart

## スタンドアロン型津波警報器の試作 Prototype of standalone tsunami alarm equipment

勝間田 明男<sup>1\*</sup>; 林 豊<sup>1</sup>; 宮岡 一樹<sup>1</sup>; 対馬 弘晃<sup>1</sup>; 馬場 俊孝<sup>2</sup>  
KATSUMATA, Akio<sup>1\*</sup>; HAYASHI, Yutaka<sup>1</sup>; MIYAOKA, Kazuki<sup>1</sup>; TSUSHIMA, Hiroaki<sup>1</sup>; BABA, Toshitaka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所, <sup>2</sup> 徳島大学

<sup>1</sup>Meteorological Research Institute, JMA, <sup>2</sup>The University of Tokushima

ゆれを感じたらすぐ高所に移動することは、最も早い津波からの避難方法の一つである。大地震の後には広域の停電などもあり、テレビ・ラジオを通じた情報収集が難しくなることもある。もし、地震直後にその地点のゆれから、津波来襲の危険性を判定する装置があると、津波避難の助けになると考えられる。

強い地震動があるということは、震源断層が近くまで伸びていることを意味する。また、強震動の継続時間が長いことは、地震の規模が大きいことを意味する。もし、強震動が30秒以上続くようであれば、地震のマグニチュードは7.5以上である可能性がある。また、もし強震動が60秒以上続くようであれば、マグニチュードが8.5かそれ以上である可能性がある。強震動の継続時間からのマグニチュード推定は、あまり高い精度が望めるものではなく規模の推定もかなり大まかにはなるが、もし停電などで他の情報が全く得られないような環境であれば、貴重な情報になりうる。また、加速度を積分して得られる速度振幅からは従来の方法に基づくマグニチュード推定もある程度可能であると考えられる。

現在では安価なMEMSセンサーが容易に入手可能である。また、多くの小型計算機もある。現在、我々は、MEMSセンサー・ワンチップマイコン・小型コンピューターなどを使った津波の可能性を知らせる単独で機能する機器の試作を行っている。

一方、震度自体もその装置の出力の一つとして考えている。震度は世界的にみれば人の感覚に基づいて測られている。日本で行われているように、計測震度がネットワークを通じて地震直後に収集できるようであれば、被災地域の早期把握に役立つと見られる。既に、計測値と改訂メルカリ震度との関係に関する報告がいくつもあり、それらを用いて改訂メルカリ震度相当値を示すことは容易である。震度それ自体も津波避難の基準として使うことができる(林・他, 当大会)。チリでは、そのように震度に基づいた避難がなされている。日本でもかなり以前には、人が報告する震度に基づき直接津波警報が出されていた。同じような方法が、地震観測網が十分ではない国では適用可能と考えられる。震度を計測する機器はそのような場合にも役立つものであると考えられる。

### 謝辞

計測部の構成において、「痛い日記」・「はじめてのPIC」などのWEBページを参照した。この調査は、部分的にSATREPSプロジェクト「津波に強い地域づくり技術の向上に関する研究」の一環として行っている。

キーワード: 津波警報器, 計測震度, マグニチュード, 強震動継続時間

Keywords: tsunami alarm, instrumental seismic intensity, magnitude, strong-motion duration

## インドネシア・フィリピン・チリのリアルタイム地震パラメータ推定システムと連動した津波予測システムの開発 Real time earthquake information and tsunami estimation system for Indonesia, Philippines and Chile regions

プリードネルソン<sup>1\*</sup>; 稲津大祐<sup>2</sup>; 齊藤竜彦<sup>1</sup>; 仙田丈二<sup>1</sup>; 福山英一<sup>1</sup>; 熊谷博之<sup>3</sup>  
PULIDO, Nelson<sup>1\*</sup>; INAZU, Daisuke<sup>2</sup>; SAITO, Tatsuhiko<sup>1</sup>; SENDA, Jouji<sup>1</sup>; FUKUYAMA, Eiichi<sup>1</sup>;  
KUMAGAI, Hiroyuki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup> 東京大学 海洋アライアンス, <sup>3</sup> 名古屋大学

<sup>1</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, <sup>2</sup>UTokyo Ocean Alliance, The University of Tokyo,

<sup>3</sup>Nagoya University

Southeast Asia as well as South American regions are within the most active seismic regions in the world. To contribute to the understanding of source process of earthquakes and long term seismic activity, the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention NIED maintains the international seismic Network (ISN) in the Asian-Pacific region. Continuous seismic waveforms from broadband seismic stations in Indonesia (148), Philippines (12), and Northern Chile (18) are currently received in real time at NIED, and used for automatic location of seismic events. Using these data we perform automatic as well as manual routine estimation of moment tensor of seismic events ( $M_w > 4.5$  in Indonesia and Philippines, and  $M_w > 4.0$  in Northern Chile) by using the SWIFT program developed at NIED (Nakano et al. 2008). Since January 2015 we started the real time calculation of local tsunamis in Indonesia, Philippines and Northern Chile using a tsunami simulation code and visualization system developed at NIED (Inazu et al. 2014), as well as earthquake source parameters estimated by SWIFT. The goals of the system are to provide a rapid and reliable earthquake and tsunami information in particular for large seismic events in the region, and produce an appropriate database of earthquake source parameters and tsunami simulations for research.

The system uses the preliminary hypocenter location and magnitude of earthquakes automatically determined at NIED by the SeisComP3 system (GFZ) from the continuous seismic waveforms in the region, to perform the automated calculation of moment tensors by SWIFT, and then carry out the automatic simulation and visualization of tsunami. The system generates maps of maximum tsunami heights within the target regions and along the coasts and display them along with the fault model parameters used for tsunami simulations. Tsunami calculations are performed for all events with available automatic SWIFT/CMT solutions. Tsunami calculations are re-computed using SWIFT manual solutions for events with  $M_w > 5.5$  and centroid depths shallower than 100 km. Revised maximum tsunami heights as well as animation of tsunami propagation are also calculated and displayed for the two double couple solutions by SWIFT. Detailed procedure for tsunami simulation is as follows;

1. Calculate two finite fault models based on seismic moment, fault mechanisms and centroid location by SWIFT, as well as by an empirical scaling relating seismic moment and fault dimensions. We use a large stress drop model by assuming, a fault length over fault width ratio of 2, and a fault average slip to fault length ratio of  $5e-5$  (Utsu 2001). These values approximately correspond to a fault average stress drop of 5MPa, implying larger values of simulated tsunami as compared to the values obtained from other scalings (i.e. Murotani et al 2008).

2. Compute the seafloor deformation using the dislocation theory (Okada 1985), for the source models obtained in step 1. In addition to the vertical seafloor deformation, we incorporate the contribution of horizontal seafloor deformation to the vertical component due to sea-floor gradient (Tanioka and Satake 1996 GRL).

3. Carry out the tsunami simulation based on a linear long-wave model and a long-wavelength filtering effect in the deep seas (Kajiura 1963).

4. Automatically publish the earthquake parameters and tsunami simulation results in the following web site:

<http://www.isn.bosai.go.jp/en/index.html>

Acknowledgments

Seismic data from Indonesia and Philippines is received at NIED under a cooperative research with BMKG (Indonesia), PHIVOLCS (Philippines), and GFZ (Germany). Data from Northern Chile is being provided by the IPOC (Integrated Plate Boundary Observatory of Chile) and Universidad de Chile.

キーワード: インドネシア, フィリピン, チリ, 地震パラメータ, 津波予測, リアルタイム

Keywords: Indonesia, Philippines, Chile, Earthquake parameters, Tsunami forecast, Realtime

## 津波即時予測のための線形分散波理論に基づく理論津波波形データベースの作成 Development of tsunami waveform database based on linear dispersive-wave theory for real-time tsunami forecasting

対馬 弘晃<sup>1\*</sup>; 林 豊<sup>1</sup>; 馬場 俊孝<sup>2</sup>; 安藤 和人<sup>3</sup>; 加藤 季広<sup>4</sup>

TSUSHIMA, Hiroaki<sup>1\*</sup>; HAYASHI, Yutaka<sup>1</sup>; BABA, Toshitaka<sup>2</sup>; ANDO, Kazuto<sup>3</sup>; KATO, Toshihiro<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所, <sup>2</sup> 徳島大学, <sup>3</sup> 海洋研究開発機構, <sup>4</sup> 日本電気株式会社

<sup>1</sup>Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, <sup>2</sup>University of Tokushima, <sup>3</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>4</sup>NEC Corporation

沖合で観測される津波波形から津波波源をリアルタイムに推定し、沿岸の津波を即時に予測する手法は、津波が沿岸に来るより前に、津波を精度良く求めるための有効な手段の一つである。気象研究所では、こうした予測を実現するため、tFISH [Tsushima et al., 2009, JGR] を開発し、現在も改良を進めている。本研究では、この予測手法の構成要素の一つであるグリーン関数データベースの高精度化を行う。tFISH では、地震発生前に、地震発生の可能性がある海域を網羅できるように、多数の要素波源をモデル領域の該当海域に配置し、各波源についての津波伝播計算を行って、各沖合津波計・沿岸地点等における津波波形をデータベース化する。これにより、地震発生後は、データベース内の津波波形を抽出し組み合わせることで、線形の波形逆解析による波源推定や、重ね合わせによる予測津波波形の合成を、短時間のうちに完了させることができる。一般に、沖合を伝播する津波は、線形長波近似でよく再現できるため、これまではこの近似に基づいてグリーン関数を計算していた。しかしながら、近年の沖合津波観測事例の蓄積とその解析によって、沖合津波計の波形を再現する上で、波数分散性の考慮が必要な場合があることがわかってきた [例えば, Saito and Furumura, 2009, JGR]。また、分散性を含む観測波形を入力とする波源推定において、線形長波近似に基づくグリーン関数を用いると、分散性を考慮していないことによるモデル化の誤差が、波源推定精度を大幅に低下させることも明らかになっている [Saito et al., 2010, JGR]。線形分散波理論に基づく津波計算は、線形長波計算に比べて計算コストが極めて高いものの、データベースとして事前準備しておけば、リアルタイム予測で行う計算は、従来と同じ手順により短時間で完了する。そこで本研究では、観測技術の高度化によって得られた観測データを最大限に活用した津波即時予測の実現に向けて、線形分散波理論に基づくグリーン関数のデータベースを構築する。

線形分散波方程式に基づく津波伝播の数値計算には、Baba et al. [2015, PAGEOPH] による JAGURS を用いた。JAGURS は、京コンピュータ上で OpenMP と MPI を駆使した並列計算を実施できるようにチューニングされている。本研究では、将来地震発生の可能性がある領域を網羅できるように、千島・日本海溝と南海トラフ沿いの海域に、波源サイズや位置を変えながら合計約 3300 の波源を配置した。こうした大量の波源に対する津波計算を現実的な時間内で完了できるようにするため、1つのジョブの投入により、すべての要素波源による分散波津波計算を同時に実施できるように設計・実装を行った。1000 を超える波源群の津波計算は、ユーザが指定したノード数で波源毎に並列計算され、異なる波源間の同期処理は行われず、南海トラフ沿い領域の合計約 1000 波源の計算を実施したところ、約 4000 ノードを同時使用することにより、約 20 時間ですべての計算を完了させることができた。これらの計算結果は、品質管理のための点検を経て、データベース化される。現在は、南海トラフ沿いの計算を完了し、千島・日本海溝沿いのデータベース作成を進めている。

本研究は、「HPCI 戦略プログラム」(分野 3) 防災・減災に資する地球変動予測の補助を受けて実施した。また、本研究の計算には京コンピュータを活用した。

キーワード: 津波即時予測, データベース, 線形分散波理論, 京コンピュータ

Keywords: real-time tsunami forecasting, database, linear dispersive-wave theory, K computer

## 船舶GNSS測位高度による巨大津波の計測の可能性 Possibilities of measuring great tsunamis using GNSS-based ship height positioning

稲津 大祐<sup>1\*</sup>; 早稲田 卓爾<sup>1</sup>; 日比谷 紀之<sup>1</sup>  
INAZU, Daisuke<sup>1\*</sup>; WASEDA, Takuji<sup>1</sup>; HIBIYA, Toshiyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学

<sup>1</sup>The University of Tokyo

津波の沖合観測はその予測および波源の推定に非常に役立つ。海底圧力やGPS海水位ブイがその観測のためによく使われる。そうしたリアルタイム観測に基づく即時予報技術は実用化されてきている (Tang et al. 2012 JGR Oceans; Tsushima et al. 2012 JGR Solid Earth)。予測や波源推定の可能性を広げるために、この他の沖合計測技術を検討しておくことは有益である。本研究では、船舶搭載のGPS測位高度記録による巨大津波の計測の可能性を検討している。高精度測位法であるキネマティック精密単独測位 (PPP) を使うことで、沖合において (数十 cm の振幅の) 巨大津波 (数十分以内の時間スケール) を計測できる可能性がある。通常の相対測位や単独測位ではこうした信号の検知は難しい。一方で、これらの低精度測位法に基づくGNSS機材は、AIS (Automatic Identification System) データ取得・送信のため、多数の船舶に広く用いられている。現状のAISデータには高度情報は含まれていないが、将来採用されることはあり得る。現在、多数の船舶による、低精度な場合を含め、高度測位が得られる場合の巨大津波の早期検知の可能性の検討を行っている。

キーワード: 津波, GNSS, 船舶, 高度

Keywords: tsunami, GNSS, ship, height

## 日本海で発生する地震津波の沖合と沿岸での津波高の関係 Relationship between tsunami heights at offshore and coastal points in the Sea of Japan

Gusman Aditya<sup>1\*</sup>; 室谷 智子<sup>1</sup>; 佐竹 健治<sup>1</sup>  
GUSMAN, Aditya<sup>1\*</sup>; MUROTANI, Satoko<sup>1</sup>; SATAKE, Kenji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

日本海東縁部では1993年北海道南西沖地震 (Mjma 7.8), 1983年日本海中部地震 (Mjma 7.7), 1964年新潟地震 (Mjma 7.5), 1940年積丹半島沖地震 (Mjma 7.5), 1833年庄内沖地震 (M 7.5) など過去にいくつかがマグニチュード7.5を超える地震が発生しており, 津波による被害をもたらした。将来発生しうる地震津波の評価のため, 2014年に国土交通省は日本海東縁部沿岸に影響を及ぼすM6.8~7.9の60の津波断層モデルを公表した。

1993年北海道南西沖地震の際にかなりの津波被害を受けた奥尻島の青苗地区を対象として, 国交省の津波断層モデルと高解像度の地形データを用い, 津波シミュレーションを行って, 水深約50mの沖合での津波高と沿岸での津波高を比較した。その結果, 沿岸での津波高が4m以下となる津波に関しては, 沿岸での波高は沖合での波高の約3.5倍という比例関係にあった。得られた回帰式は, 粗いグリッドの地形データを用いて津波シミュレーションを行った際の, 沿岸での津波高を推定するための増幅率として扱うことができる大きな津波については, そのような比例関係は得られなかった。

日本海沿岸全域に対しても同様に国交省の60の津波断層モデルを用いて, 水深約50mの沖合と沿岸での津波高の計算を行い, 156の市町村について沿岸域で1m以上の津波高が予想され, 津波被害をもたらす可能性がある断層を抽出した。線形長波式によって計算された沖合と沿岸での津波高の関係は, 場所によって異なるが, 海底地形の傾斜による起因が大きいと思われる。

謝辞: この研究は文部科学省受託研究「日本海地震・津波調査プロジェクト」の一環として行われました。

キーワード: 津波シミュレーション, 津波浸水域, 海域活断層, 日本海

Keywords: Tsunami simulation, Tsunami inundation, Active faults, The Sea of Japan

## 津波シミュレーション結果のアレイ処理による遠地津波の波線の自動作成と伝播経路の特定 Estimation of tsunami propagation paths using the array analysis of tsunami simulation results

中田 健嗣<sup>1\*</sup>; 宮岡 一樹<sup>1</sup>; 勝間田 明男<sup>1</sup>  
NAKATA, Kenji<sup>1\*</sup>; MIYAOKA, Kazuki<sup>1</sup>; KATSUMATA, Akio<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象庁気象研究所

<sup>1</sup> Meteorological Research Institute, JMA

日本から遠く離れた遠地で発生した地震による津波は、日本沿岸には最大波が第一波から遅れて発現することが多くある。実際、例えば、2010年チリ中部沿岸の地震による津波の際には、根室市花咲に最初の押し波が到達後、約1時間半後に高い波が到達、さらに約4時間半後に最大波が観測された(気象庁,2010)。そのため、日本沿岸で観測される津波がいつ、どこから伝播してくるかを容易に把握できるようにしておくことは、津波の監視上、重要であると考えられる。

伝播経路は、海底地形による屈折を計算して波線を理論的に得る方法があり、計算機で行う Satake (1988) や手作業による渡辺 (1985) の例がある。また、伝播図 (例えば、2010年チリ中部沿岸の地震について、気象庁,2010) がある。これらは精度良く理論的に得られるが、実際の地震の事例に関して、任意の時間帯にどの経路からやってきたか等の情報まではない。また津波シミュレーションでは、振幅も含めた水位分布 (スナップショット) を確認できるが、伝播経路を1枚の図で確認できる形にはならない。そこで、本研究では、日本付近で観測される津波記録に対応した伝播経路を、時間帯別に1枚の図に自動で図示できることを目的とした。

手法は次の方法を試みた。津波シミュレーション計算 (Tanioka (1998) 等) により各計算格子で得られる水位の時系列波形をアレイ観測データと見立てる。それに、地震等で行われている複数の波形を足し合わせて処理するアレイ処理 (センブランス解析) (Neidell and Taner, 1971) を適用して、ある基準点に対する到来方向を求め、それを過去の時間にさかのぼって繰り返し行うことで津波の伝播経路 (波線) を得る。アレイは、ある基準点を囲むように、経度、緯度方向にある格子間隔だけ離れた複数の点で構成する。アレイ処理点の波形はそれぞれ似た波形であることを前提とするが、あまり基準位置から近い点だと到来方向を変化させたときのコントラストが出ないため、ある程度は基準点から離す必要がある。基準点とアレイ処理点の2点間の距離と2点の平均水深を用いた位相速度から遅れ時間を求め、すべてのアレイ処理点の波形について遅れ時間だけずらした波形を足し合わせ、1つの波形とする。その波形に対して、ある時刻について時間幅で足し合わせ、元波形の足し合わせで割り、センブランス値とする。以上を、到来方向を変化させて行い、最大の場合をその基準位置に対する波の到来方向とする。さらに、これを、ある固定の距離だけ到来方向に過去にさかのぼったときの時間を求め、次のステップの時刻を算出する。現在までの解析であるが、次のとおり設定した。アレイ構成点数 (基準位置を四角で取り囲むよう設定): 8点、基準位置とアレイ処理点間の経度・緯度方向の格子数: 21 (緯度に依るが、5分\*21格子=約1.7度、約150km)、到来方向走査間隔: 10度、1ステップあたりのさかのぼり距離: 110km、センブランス値の時間幅: 40~60分。

適用事例として、2010年チリ中部沿岸の地震 (Mw8.8) を対象とした。1枚断層でシミュレーション計算 (空間5分格子) を行い、その結果を日本付近の沖合の観測記録 (DART(NOAA) 3地点、北から順に21419、21413、52401) と比較し、最初の数波 (2~3時間分) (日本沿岸での後続波は考えず、太平洋を伝播してきた最初の数波の部分に着目) が概ね合っていることを確認した。これらの時間帯の時系列波形の個々の波について時間を逆にたどり伝播経路 (波線) を得た。21413では第一波で大きな波が一つの波群となっており、これから波線をたどった結果、チリの波源域に向かって直線的な波線が得られた。これは津波の放射方向と一致している。一方で、21413の北側の21419や南の52401では第一波の後、1~2時間ほど経過してから大きい波が現れている。この第一波から大きい波までの波群について個々に波線をたどると、それぞれ異なる伝播経路の波線が得られた。これは、異なる伝播経路であるハワイの北側や南側等を通るルートを通る津波が通過し、それらの波が重ね合わさっていることを示していると考えられる。これらは水位分布から津波の伝播を確認したところ、傾向が合っていた。今回のケースでは、センブランス値の時間幅をあまり小さく (10~20分) とると波線が安定しない場合があった。波群を安定して追跡するためには、津波の記録の周期等に合わせる必要があるだろう。

本手法では、実際に観測された沖合の波形に対応する計算波形にアレイ処理を適用することで個々の波群に対応する伝播経路を自動で1枚の図に時間帯別に図示できた。このような図は津波監視の参考となるものと考えられる。また、今回、観測記録と比較が容易な沖合の観測点からさかのぼりとしたが、沖合の21419等と同様に沿岸の検潮所地点でも遅れて高い波が現れており、得られる伝播経路の図は、沿岸の検潮所にも参考になるものと考えられる。

キーワード: 津波シミュレーション, 波線解析, 最大波, アレイ解析, 伝播経路, 遠地津波

Keywords: tsunami simulation, backward ray analysis, maximum wave, array analysis, propagation path, distant tsunami

## 実測に基づいた土佐清水港内外の海面変動に関する一考察 An investigation of sea level fluctuation around the Tosashimizu Port by observed data

田野邊 睦<sup>1\*</sup>; 今井 健太郎<sup>2</sup>; 林 豊<sup>3</sup>; 阿部 邦昭<sup>4</sup>; 今村 文彦<sup>2</sup>  
TANOBE, Atsushi<sup>1\*</sup>; IMAI, Kentaro<sup>2</sup>; HAYASHI, Yutaka<sup>3</sup>; ABE, Kuniaki<sup>4</sup>; IMAMURA, Fumihiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院, <sup>2</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>3</sup> 気象研究所, <sup>4</sup> なし

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Tohoku University, <sup>2</sup>IRIDEs, Tohoku University, <sup>3</sup>Meteorological Research Institute, <sup>4</sup>None

### 1. はじめに

津波などの長周期波が港湾部に侵入すると、その地形条件と津波の周期によっては副振動が発生する可能性がある。これまでの津波事例でこのような副振動が確認されている。固有周期に起因した水位変動に対する研究は観測データを用いた手法1や数値計算を用いた手法2を用いて、対象とした港湾の海面変動とその地形条件から副振動の卓越周期を求め、さらにその増幅特性について議論をしている。しかし、その多くが対象とした港湾内のみを解析したものであり、湾内の海面変動の駆動力を担う湾外を含めた解析研究は少ない。

本研究では、既往研究によって1,3, その副振動特性が比較的明らかにされている高知県土佐清水港を対象として、その湾内外で潮位観測を実施し、土佐清水港内外で発生する副振動の特性について検討を行うことを目的とする。

### 2. 観測データ

本研究では、高知県土佐清水港内外に水圧計を計7器設置し、2014年9月10日から2014年12月9日までの期間、計測間隔15秒で潮位観測を行った。得られた観測データに対して潮汐成分を除去するために8-128minのバンドパスフィルタによる処理を施した。湾内の水面変動の実態を把握するために、潮汐を除いたデータを気象擾乱の影響を受けていない期間(以下、平時)と気象擾乱(気象イベント)の影響を受けている期間(以下、気象イベント時)に分割し、それぞれを別個の解析対象とした。

上記の観測データに対してスペクトル解析を行い、土佐清水港における副振動の実態や特性の考察を行った。

### 3. 結論

本研究では、2014年9月10日から2014年12月9日までの潮位データを解析し、土佐清水港における副振動の実態・特性に付いての検討を行い以下の結果を得た。

① 平時のスペクトル解析の結果から、土佐清水港は港内では平時のメリアン式から求められる固有周期である20min周辺で強いピークを持ち、港奥から港口に近づくにつれ40min近辺にピークが現れ始める。港外では40, 60, 85minといった周期帯にピークがみられた。

② 気象イベント時の観測点のスペクトル解析の結果から、土佐清水港内で2040min近辺で強いピークが見られる。一方で湾後部湾外では40minのピークは見られず3075min近辺でピークがみられた。

以上の結果から、平時・気象イベント時共に湾内外でピークが現れる周期帯は異なっており、土佐清水港はその内外で異なる副振動特性をもつ様子が確認された。また、イベント時に港内で現れた40min近辺のピークは湾の固有周期とも異なり、その生成要因については、今後の検討が必要である。

### 謝辞

謝辞: 本研究はJSPS科研費(代表: 林豊, 基盤研究(B): 研究課題番号24310132)の補助を受けました。ここに記して、謝意を表します。

### 参考文献

1. 阿部邦昭(2011): 静振の再測から求めた湾や港の卓越周期(2) 西南日本太平洋岸, 日本歯科大学紀要, vol.40, pp.23-30
2. 高橋将(1986): 石狩湾の津波と副振動, 北海道大学工学部研究報告, vol.130, pp.17-32
3. 村上仁士, 島田富美男(1979): 現地資料および実測に基づく副振動の特性に関する考察(2), 第26回海岸工学講演会論文集, pp.129-132

キーワード: 副振動, スペクトル, 土佐清水

Keywords: secondary undulation, spectrum, Tosashimizu

## 芦ノ湖で発生したサイスミック・セイシュ Seismic - Seiche generated at Lake Ashinoko

原田 昌武<sup>1\*</sup>; 板寺 一洋<sup>1</sup>; 行竹 洋平<sup>1</sup>  
HARADA, Masatake<sup>1\*</sup>; ITADERA, Kazuhiro<sup>1</sup>; YUKUTAKE, Yohei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神奈川県温泉地学研究所

<sup>1</sup> Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

湖の水位は、その形状や水深などによって規定される固有周期を持ち、その周期によって振動する。この振動は気圧変動や風などの気象的な要因や、湖に振動を与える外的要因によっても発生し、セイシュ (seiche、静振) と呼ばれている。ここでは、特に地震によって励起されたものをサイスミック・セイシュと呼ぶ。

神奈川県箱根町にある芦ノ湖については古くからセイシュの研究が行われており、中村・吉田 (1901) は水位観測を行い、同湖の固有周期を求めた。彼らの解析結果によれば、定常時の芦ノ湖の水位は T1 (周期 15.38 分)、T2 (周期 6.76 分)、T3 (周期 4.63 分)、T4 (周期 3.90 分)、T5 (周期 3.11 分) の 5 つの固有周期を持つことが示されている (Nakamura and Honda, 1911)。この研究の後、1930 年 11 月 26 日に芦ノ湖直近 (南側) で北伊豆地震 (M7.3) が発生した。今村・小平 (1932) は、この地震によって励起された芦ノ湖のサイスミック・セイシュの周期は、Nakamura and Honda (1911) によって指摘された T1 と T2 が卓越しており、特に T2 の振動が顕著であったことを明らかにしている。

そこで我々は、芦ノ湖の最近の水位観測データを用いて、芦ノ湖における静穏時のセイシュ (水位変動の固有周期)、および地震によって励起されたサイスミック・セイシュの特徴を調査した。水位観測は芦ノ湖北端部の湖尻水門付近において実施しており、テレメータによって 1Hz サンプリングデータがリアルタイムに送信される。これらの秒値データから、1 分平均値データを作成し、タイムウィンドウを 256 分としたランニング・スペクトルを計算した。その結果、静穏な期間の振幅スペクトルからは、T1 および T2、T3、T5 の周期が現れていることがわかった。また、東北地方太平洋沖地震 (2011.03.11、M9.0) の後には、顕著なサイスミック・セイシュが発生しており、その際には T3 と T5 の周期の振幅が増大し、最大 20 時間程度継続していることが明らかとなった。さらに、静穏時には見られなかった T4 と、T5 よりもさらに短周期の波 (ここでは、T6 (周期 2.19 分) とする) が地震後に顕著に励起されていることがわかった。

東北地方太平洋沖地震によって励起されたサイスミック・セイシュは上記の通りであるが、本発表ではその他の地震によるセイシュの発生状況や、その発生メカニズムについて議論する。

キーワード: サイスミック・セイシュ, 芦ノ湖, スペクトル解析, 固有周期

Keywords: Seismic-Seiche, Lake Ashinoko, Spectrum Analysis, Natural Periods

## 津波による大阪湾の海底堆積物の再懸濁 Resuspension of Marine Sediment in Osaka Bay by Tsunami

林 美鶴<sup>1\*</sup>; 鈴木 綜人<sup>1</sup>; 中田 聡史<sup>1</sup>  
HAYASHI, Mitsuru<sup>1\*</sup>; SUZUKI, Soyo<sup>1</sup>; NAKADA, Satoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学

<sup>1</sup> Kobe University

南海トラフ地震で引き起こされる津波で、大阪湾の海底堆積物が巻き上げられるか（再懸濁が起こるか）を無次元剪断応力により推定した。また、再懸濁が発生する／しない条件を検討した。現在予測される津波（最大流速 1.8 m/s）では、大阪湾の西部（水深 30m 以上）では含水率が低いため（57 %以下）、再懸濁は発生しない。一方、東部（水深 30m 以下）では再懸濁が発生する。東部の 90 % 占める領域では含水率が高いため（60 %以上）、弱い流速でも（0.5m/s）再懸濁が始まる。比較的含水率の低い海域（47%以上）も含め、2.9m/s 以上になると東部の全域で再懸濁が発生する。特に、淀川河口などでは、強い流速が断続的に発生するため、巻き上げが起り続ける Hot Spot となる。大阪湾の東部の海底堆積物は多くの物質や生物を含有していることから、懸濁物だけでなく、これらの海中へ放出が海洋環境に影響を与える可能性がある。

キーワード: 津波, 堆積物, 再懸濁, 大阪湾, 南海トラフ, 剪断応力

Keywords: Tsunami, Sediment, Resuspension, Osaka Bay, Nankai Trough, Shear stress

## 17世紀北海道巨大津波が東北地方に与える影響 Effects of the 17th century great Hokkaido tsunami on Tohoku regions

伊尾木 圭衣<sup>1\*</sup>; 谷岡 勇市郎<sup>1</sup>  
IOKI, Kei<sup>1\*</sup>; TANIOKA, Yuichiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学理学研究院附属地震火山研究観測センター

<sup>1</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University

Historically, great underthrust earthquakes occurred off east Hokkaido, Japan because the Pacific plate subducts beneath the Okhotsk plate. Also, tsunami deposits by prehistoric tsunami have been found off east Hokkaido on the coast of Pacific Ocean.

Previous study suggest that the 1611 Keicho tsunami earthquake is the 17th century great earthquake (Okamura and Namegaya, 2011). In this study, we examined effects of the 17th century great tsunami generated off east Hokkaido on the coast of Pacific Ocean in Tohoku region.

We estimated fault model of the 17th century great earthquake by using locations and elevations where tsunami deposits were found (Ioki and Tanioka, 2013). The result shows that tsunami inundation spread far inland were explained by a large rupture area at deep part of the plate interface. Surveyed tsunami heights near the coast were explained by very large slip amount at shallow part of the plate interface near the trench. The total seismic moment of the 17th century great earthquake was calculated to be  $1.7 \times 10^{22}$  Nm ( $M_w$  8.8).

Tsunami heights and inundation were also calculated along the coast of Pacific Ocean in Tohoku region. Computed tsunami heights along the coast were almost less than 4 m and computed tsunami inundation area is very small at Yamada bay. Even if slip amount of estimated fault model is two or three times larger, computed tsunami inundation area in Tohoku region is small. Tsunami inundation area by the 1611 Keicho tsunami were not explained by our estimated fault model. By an effect of directivity, high tsunami was propagated toward east Hokkaido and low tsunami was propagated toward Tohoku.

キーワード: 津波, 巨大地震, 北海道, 千島海溝

Keywords: tsunami, great earthquake, Hokkaido, Kurile trench

## Tsunami simulation for the Korean Peninsula using a Nankai-Tonankai earthquake scenario

### Tsunami simulation for the Korean Peninsula using a Nankai-Tonankai earthquake scenario

Kim Satbyul<sup>1\*</sup>; 福山 英一<sup>2</sup>; 齊藤 竜彦<sup>2</sup>; KANG, Tae-Seob<sup>1</sup>  
KIM, Satbyul<sup>1\*</sup>; FUKUYAMA, Eiichi<sup>2</sup>; SAITO, Tatsuhiko<sup>2</sup>; KANG, Tae-Seob<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pukyong National University, <sup>2</sup>Nat'l Res. Inst. Earth Sci. Disas. Prev.

<sup>1</sup>Pukyong National University, <sup>2</sup>Nat'l Res. Inst. Earth Sci. Disas. Prev.

There is a Korean historical document which records an observation of anomalous tidal waves at Jeju Island in 1707. The date corresponds to the occurrence of the great 1707 Hōei earthquake (M8.4) which occurred in the Nankai trough off southwestern Japan. This record suggests a possibility that the tsunami waves caused by the Hōei earthquake reached the Korean peninsula. In this study, we investigate whether the tsunami caused by an anticipated Nankai-Tonankai earthquake will affect to the Korean peninsula or not. We conducted a tsunami simulation based on the nonlinear longwave equations with a dynamic rupture scenario that breaks the whole Nankai-Tonankai area as a single event. We used the dynamic rupture scenario computed by Hok et al. (2011, JGR). The simulation shows tiny tsunami arrivals in Jeju Island about 4 hours after the start of tsunami propagation. At 12 points around the Jeju Island and 2 points between China and Jeju, tsunami heights are computed. We obtained larger tsunami heights (~0.08 m) at the western side of the Jeju than the eastern side (~0.05 m), and we observed the largest amplitude (~0.17 m) at the southwestern coast. Also, we found that a larger tsunami wave reaches the eastern coast of China, in contrast to the Korean peninsula. Small tsunami amplitudes are observed at Jeju Island because the first tsunami wavefronts attenuated while turning around Kyusyu Island. This kind of simulation would be useful to understand how tsunamis originating at southwestern Japan propagate to Korea, which will serve for the mitigation of tsunami disasters in the Korean peninsula.

キーワード: Tidal waves record at Jeju Island, Nankai-Tonankai earthquake, Numerical simulation

Keywords: Tidal waves record at Jeju Island, Nankai-Tonankai earthquake, Numerical simulation

歴史記録に基づいた1854年安政南海地震による高知県西部沿岸の津波高さと被害率との関係  
Relationships between heights and damage of the 1854 Ansei Nankai tsunami along west coast of Kochi prefecture, Japan

行谷 佑一<sup>1\*</sup>; 今井 健太郎<sup>2</sup>  
NAMEGAYA, Yuichi<sup>1\*</sup>; IMAI, Kentaro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>産総研 活断層・火山研究部門, <sup>2</sup>東北大 災害科学国際研究所  
<sup>1</sup>IEVG, AIST, <sup>2</sup>IRIDeS, Tohoku University

歴史時代の津波の高さを推定するには、歴史資料に書かれた記述、とくに具体的に高さのわかる記述をもとに現地測定するのが一般的である。一方で記述の中には流失などの被害を受けた家屋の戸数のみが記されている場合がある。この場合、ある程度の高さの津波が浸水したことは確かであるが、その情報から津波高さを簡単には推定できない。推定するには津波の高さと被害率とを結びつける、津波被害関数（たとえば、Koshimura et al., 2009, JDR）を利用することが有効と考えられる。しかしながら津波被害関数は基本的には近年発生した津波が対象とされている。現代と江戸時代とは家屋の強度に違いがあると考えられるので、江戸時代における津波の高さと家屋の被害率との関係を構築することが望ましい。そこで本研究では1854年安政南海地震津波による被害数を整理し、算出される被害率と津波高さとの関係を調べた。利用した史料は『新収日本地震史料第5巻別巻5』に掲載された『嘉永甲寅年大地震筆記 徳永達助記録』である。ここには流失や全潰、および大破などの被害を受けた家屋の数が記載されている。そこでこの被害数から Hatori (1964, BERI) を参考に被害率（ $[\text{流失家屋数} + \text{全潰家屋数} + \text{半潰家屋数} \times 0.5 + \text{大破小破家屋数} \times 0.5] / [\text{全家屋数}]$ ）を算出した。各集落の全家屋数は本史料に記載されていないため、寛保郷帳に記された家屋数を利用した。つぎに、被害率が算出された集落（高知県西部の沿岸集落、中土佐町～土佐市の一部）について津波高さを既存文献（たとえば都司・他, 1994, 歴史地震）をもとに整理し、被害率と対応づけた。この結果、津波の高さが2 m の場合は被害率が0であったが、5 m を越えると被害率は急激に上昇し0.8 を越す傾向がみられた。

キーワード: 津波高さ, 被害率, 安政南海地震津波, 高知県

Keywords: tsunami height, damage ratio, the 1854 Ansei Nankai earthquake tsunami, Kochi prefecture

## 日本海で発生したM7クラスの地震の津波断層パラメータの推定 Tsunami source model of M7 earthquakes occurred in the Sea of Japan

室谷 智子<sup>1\*</sup>; 佐竹 健治<sup>1</sup>; 原田 智也<sup>1</sup>  
MUROTANI, Satoko<sup>1\*</sup>; SATAKE, Kenji<sup>1</sup>; HARADA, Tomoya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>ERI, the Univ. of Tokyo

日本海東縁部では、太平洋側と比べて、大地震の規模は小さく、また発生頻度も低いものの、20世紀にはM7.5以上の大地震(1940年積丹半島沖地震(Mjma 7.5), 1964年新潟地震(Mjma 7.5), 1983年日本海中部地震(Mjma 7.7), 1993年北海道南西沖地震(Mjma 7.8))が発生している。これらの地震に関しては、地震波形や津波波形を用いた詳細な解析が行われているが、M7程度の地震については詳細な解析は少ない。日本海東縁部には多くの海域活断層が存在し、M7クラスの地震でも震源が陸に近ければ、地震動や津波による被害を受ける可能性がある。そこで本研究では、日本海で発生した1964年男鹿半島沖地震(Mjma 6.9), 1971年サハリン西方沖地震(Mjma 6.9), 1983年青森県西方沖地震(Mjma 7.1)によって観測された津波波形を再現するための断層パラメータの推定を行った。

上記の3地震について、津波波形を計算し、検潮所での観測波形との比較を行った。津波波形の計算は、JTOPO30とM7000シリーズの海底地形データから作成した3秒(90m)のグリッドデータと非線形長波式を用い、JAGURS(Baba et al., 2015, PAGEOPH)の並列津波計算コードによった。1964年の地震では、江差・福島・岩崎・船越・船川・秋田・酒田・下瀬・新潟の9か所、1971年は稚内・香深・天塩・羽幌・留萌・小樽・忍路・岩内とサハリンのKholmsk・Nevelskの10か所、1983年は稚内・仙法志・石狩・岩内・江差・吉岡・三厩・深浦・能代・船川・酒田・粟島・岩船・両津の14か所の検潮所で観測された津波波形を用いた。入力とした津波断層モデルは、遠地実体波インバージョン(Kikuchi and Kanamori, 1991, BSSA)によって得られた不均質すべりモデルと、試行錯誤的に推定した矩形断層パラメータを用いた。遠地実体波インバージョンによって得られたパラメータは、1964年の地震は断層サイズ90 km x 40 km, Mw 6.8, 平均すべり量0.2 m, 1971年は断層サイズ70 km x 40 km, Mw 6.8, 平均すべり量0.2 m, 1983年は断層サイズ30 km x 30 km, Mw 6.7, 平均すべり量0.3 mであった。このうち1971年と1983年の不均質断層モデルから計算された津波波形は、観測波形に比べて振幅がかなり小さかったため、矩形断層での平均すべり量を大きくしたところ、振幅の大きさは再現されるようになった。遠地実体波インバージョンで得られた地震モーメントは、やや過小評価の可能性もある。また1964年の地震を含め、走時が一致しない観測点も多く、津波波形の再現に向けて、観測記録の時刻精度の確認や断層の位置や走向などをさらに修正する必要がある。引き続き、遠地実体波インバージョン結果の精査と非線形分散波式による津波波形の計算を行い、観測波形との比較から断層パラメータの推定を行っていく予定である。

謝辞: 本研究は、文部科学省受託研究「日本海地震・津波調査プロジェクト」の一環によって実施されました。日本での検潮所の記録は、東京大学地震研究所の津波波形画像検索システムのデータを使用させていただき、サハリンでの検潮記録は、IMGGのG. Shevchenko氏とA. Loskutov氏にご提供いただきました。また、徳島大学の馬場氏には、JAGURSの並列津波計算コードをご提供いただきました。

キーワード: 津波断層モデル, 断層パラメータ, 津波波形解析, 日本海東縁部

Keywords: tsunami source model, fault parameter, tsunami waveform analysis, eastern margin of the Sea of Japan

## 大すべり域, 超大すべり域, 破壊開始点および地震規模の不確かさを考慮した多数津波シナリオの提案と南海トラフへの適用例 Multiple Tsunami Scenarios considering Large Slip Zone, Super Large Slip Zone, Hypocenter and Seismic Magnitude

門廻 充侍<sup>1\*</sup>; 高橋 智幸<sup>2</sup>

SETO, Shuji<sup>1\*</sup>; TAKAHASHI, Tomoyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 関西大学大学院 社会安全研究科, <sup>2</sup> 関西大学 社会安全学部

<sup>1</sup>Graduate School of Safety Science Kansai University, <sup>2</sup>Faculty of Safety Science Kansai University

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波により我が国は甚大な被害を受けた。この津波災害は、想定を超えた外力により、著しく被害が拡大することをあらためて示した。想定外を防ぐためには多数シナリオが有効であり、津波防災においても様々な検討がなされてきた(例えば、高橋ら, 1995; 河田ら, 2003a; 河田ら, 2003b; 鈴鹿ら, 2004; 富岡ら, 2005; 鈴木・河田, 2012)。しかし、その多くは巨視的断層パラメータを中心にしたもので、アスベリティなどの微視的断層パラメータに関する不確かさの考慮は十分とは言えない。

東北地方太平洋沖地震津波の発生を受け、内閣府(2012)は大すべり域と超大すべり域を踏まえた津波断層モデルを発表している。同モデルを受け、様々な機関が新たな断層モデルの想定を行っている。しかしながら、大すべり域および超大すべり域の位置や形状に関する考え方は異なり、標準の考え方は定まっていない。例えば、震源域が同じでも大すべり域および超大すべり域の形状や位置が異なれば、発生する津波の特徴も異なる。それ故に、大すべり域および超大すべり域を設定する標準モデルが必要とされている。

門廻・高橋(2014)は大すべり域および超大すべり域の不確かさを多数津波シナリオに導入する汎用的なモデルの提案を行い、南海トラフの巨大地震を対象に同モデルを適用した。このモデルは、背景領域、大すべり域、超大すべり域で構成されており、各領域の面積、すべり量、形状、位置および破壊開始点を設定する必要がある。同モデルの主な特徴は、津波断層における大すべり域の面積割合などの係数を決めると機械的に多数津波シナリオが設定できる点である。結果として、門廻・高橋(2014)は15ケースの多数津波シナリオを示した。しかしながら、破壊開始点の不確かさ、複数のLSZ、SLSZ、地震規模の不確かさを考慮していない点が改善点となっていた。

そこで本研究では、上記3点をさらに考慮することができる新たなモデルを提案する。門廻・高橋(2014)と比較した場合、本研究で提案するモデルの特徴は、(1)スケーリング則を考慮して地震規模の不確かさを検討できる、(2)1組に加え、2組の大すべり域、超大すべり域を検討できる、(3)破壊開始点の不確かさを検討できる点にある。提案モデルを南海トラフに適用し、多数津波シナリオの設定手順を具体的に示した。その結果、提案モデルでは、数百ケースのシナリオが想定された。想定されたシナリオを用いて、津波伝播計算を実施し、GPS波浪計において水位変動を出力した。旧モデルと比較するために、GPS波浪計において24時間以内に観測される最大水位変動量を検討した。

キーワード: 津波断層, 不確かさ, 南海トラフ, GPS 波浪計

Keywords: Tsunami fault, Uncertainly, Nankai trough, GPS buoy

## 確率論的津波浸水深ハザード評価における沖合での津波水位の不確実性の影響 Effect of uncertainty in offshore tsunami heights on the probability inundation hazard assessment

阿部 雄太<sup>1\*</sup>; 是永 眞理子<sup>1</sup>; 秋山 伸一<sup>1</sup>; 松山 尚典<sup>2</sup>; 村嶋 陽一<sup>3</sup>; 藤原 広行<sup>4</sup>

ABE, Yuta<sup>1\*</sup>; KORENAGA, Mariko<sup>1</sup>; AKIYAMA, Shinichi<sup>1</sup>; MATSUYAMA, Hisanori<sup>2</sup>; MURASHIMA, Yoichi<sup>3</sup>; FUJIWARA, Hiroyuki<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 伊藤忠テクノソリューションズ, <sup>2</sup> 応用地質株式会社, <sup>3</sup> 国際航業株式会社, <sup>4</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup> ITOCHU Techno-Solutions Corporation, <sup>2</sup> OYO Corporation, <sup>3</sup> KOKUSAI KOGYO CO., LTD., <sup>4</sup> National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

様々な種類の地震によって生じる津波の危険性を評価するため、津波による陸域の浸水深に対する確率論的ハザード評価の適用が検討されてきた(齊藤・他, 2014, JpGU)。一般に、ある地震によって発生した津波が沿岸から内陸部に向かってどのように浸水するかの推定は津波伝播の数値シミュレーションにより決定論的に求められる。ただし、この計算結果には震源特性・伝播特性・サイト特性などの様々な不確実性が内在しており、この不確実性は沖合または沿岸の津波水位のばらつきとして現れる。津波による陸域での浸水深を確率論的に評価しようとする、数値計算において防潮堤のような構造物を設定した場合には、津波が構造物を越えるかどうかで陸域の浸水の結果が大きく変わる。すなわち、ある地震の計算結果において津波が構造物を越えなかった場合においても、沖合の津波水位の不確実性によって津波が構造物を越える可能性があり、その影響を評価する必要がある。

本研究では、陸前高田市における確率論的浸水深ハザード評価の検討事例を基に、沖合の津波水位の不確実性の影響の評価方法を提案する。まず、沖合と陸域にそれぞれ津波の評価地点を設置し、沖合最大津波水位と陸域最大浸水深の相関関係について調べた。沖合最大津波水位-陸域最大浸水深の分布は、津波水位が小さい波源モデル群ではばらつきが大きいものの、津波水位が大きくなるにつれてばらつきが小さくなり直線で近似できることが分かった。つぎに、分布を近似する相関直線を求め、これを沖合の最大津波水位から陸域の最大浸水深を推定するためのモデルとした。陸域評価地点において浸水しなかった波源モデル群を用いて沖合で不確実性を考慮したハザードカーブを計算し、このハザードカーブを相関直線によって陸域の浸水深ハザードカーブへと変換した。

本発表では、防潮堤を超えた計算結果のみから求められるハザードと防潮堤を超えない計算結果も含めたハザード評価結果を比較し、両者の差異について考察を加える。本研究は、防災科研において進められている「全国を対象とした津波ハザード評価」の一環として実施された。

キーワード: 津波, 浸水, ハザード評価, 確率

Keywords: tsunami, inundation, hazard assessment, probability